

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN POR BARRO ASOCIADO A DISTINTOS  
DISEÑOS, MINA EL TENIENTE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**NOLBERTO IGNACIO VEGA CARRASCO**

PROFESOR GUÍA

JAVIER ANDRES CORNEJO GONZALEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MAURICIO ALEJANDRO MELENDEZ BRIONES

SEBASTIAN LOPEZ DIAZ

SANTIAGO

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas  
**POR:** Nolberto Ignacio Vega Carrasco  
**PROFESOR GUÍA:** Javier Cornejo González

**ANÁLISIS DE LA CONTAMINACION POR BARRO ASOCIADO A DISTINTOS  
DISEÑOS, MINA EL TENIENTE**

En la minería de Block/Panel Caving la contaminación de puntos por barro es un problema de gran complejidad, ya que afecta principalmente la vida de las personas, además de los equipos y el negocio minero. En base a esto, existen varios estudios asociados a los factores que afectan el ingreso de agua barro a puntos de extracción. Sin embargo, hasta la fecha no han sido considerados los efectos de los diseños en la problemática. Dichos diseños tienen como principales consideraciones la estabilidad de la mina y los equipos a utilizar. No obstante, la construcción de los diseños mineros no incorpora como parámetro el ingreso de agua barro.

Mediante un análisis estadístico de la historia de tres tipos de mallas de extracción, se logró obtener conclusiones similares sobre variables ya conocidas en el ingreso de agua barro. De la misma forma, se analizaron otras variables poco estudiadas, como la fragmentación y los diseños de mallas de extracción. Con la primera se comprobó lo mencionado en la literatura existente, donde la presencia de material más fino presenta mayor porcentaje de ingreso de agua barro, esto basado en que el 90% de los puntos contaminados presentan dicha fragmentación.

Por otra parte, los diseños de mallas de extracción más pequeños pueden recuperar mayor porcentaje de la columna de roca primaria, en comparación a mallas de extracción de mayor tamaño, ya que menor distancia entre puntos de extracción permite una mayor interacción de los elipsoides, produciendo que el barro baje de forma regular hacia los puntos. En cambio, en diseños más grandes éste se asemeja a un tiraje aislado, permitiendo que el barro salga mayoritariamente por un punto, contaminándose antes a sus vecinos.

Con el análisis estadístico de las variables estudiadas se generó un modelo analítico de la contaminación por barro, mediante una regresión logística multivariable. El modelo consideró todas las variables estudiadas que presentaban relevancia estadística y sentido físico, donde la principal mejora en los ajustes (comparados con otros modelos construidos) es la incorporación de la variable fragmentación, ya que el porcentaje de acierto del modelo para diferentes sectores tiene como cota mínima el 65% de acierto global. Además, el modelo se validó con el bloque 2 de Esmeralda, donde el modelo acertó en 95% del estado de los puntos.

Por otra parte, con el modelo de regresión logística se pudo determinar el peso de las principales variables consideradas en el estudio, donde la fragmentación aumenta en un 30% la probabilidad de ingreso de agua barro. En cambio, el tipo de malla utilizada presenta un aumento o disminución de la probabilidad cercano al 5%.

Por último, se realizaron simulaciones de los tres tipos de mallas estudiadas mediante el software Flowsim®, considerando el barro como material fino. Los modelos fueron calibrados con los datos históricos y extracción de 2000 toneladas de material diluyente para ser considerado barro. De los modelos se seleccionó el modelo del bloque 1 de Esmeralda, ya que presenta un mejor ajuste. En este modelo se varió el espaciado de puntos, mientras que el resto de los parámetros se mantuvieron iguales, para notar que la malla de menor tamaño presenta más interacción y extrae menos material diluyente, en comparación a una malla de mayor tamaño.

## ABSTRACT

In the Block/Panel Caving mining, the contamination of drawpoints by mud is a problem of great complexity, since it affects mainly the safety of workers, in addition to the equipment and the mining business. Based on this, there are several studies associated with the factors that affect the entrance of mud to drawpoints. However, to date the effects of the designs have not been considered in the problem. These designs have as main considerations the stability of the mine and the equipment to be used. Nonetheless, the construction of the mining designs does not incorporate the entry of mud as a parameter.

Through a statistical analysis of the history of three types of extraction layouts, it was possible to obtain similar conclusions about variables already known in mud entry. In the same way, other variables that are not fully understood were analyzed, such as fragmentation and extraction layout designs. Through the first variable, it was possible to verify what is mentioned in the literature, where the presence of finer material has a higher percentage of mud entry, based on the fact that 90% of the contaminated drawpoints have such fragmentation.

On the other hand, smaller extraction layout designs can recover a greater percentage of the primary rock column compared to larger extraction layouts, since a smaller distance between drawpoints allows a greater interaction of the ellipsoids, causing that the mud descends in a regular shape towards the drawpoints. However, in greater layouts it resembles an isolated draw, allowing that the mud leaves mainly by a single drawpoint, contaminating itself before its neighbors.

With the statistical analysis of the variables studied, an analytical model of mud contamination was generated by means of multivariable logistic regression. The model considered all the variables studied that presented statistical relevance and physical sense, where the main improvement in the settings (compared with other built models) is the incorporation of the fragmentation variable, since the confidence percentage of the model for different sectors has a minimum global level of 65%. In addition, the model was validated with Esmeralda's Block 2, where the model was successful in 95% regarding the condition of the drawpoints.

On the other hand, with the logistic regression model it was possible to determine the weight of the main variables considered in the study, where fragmentation increases by 30% the probability of mud entry. On the other hand, the type of layout used presents an increase or decrease of the probability close to a 5%.

Finally, simulations of the three types of layouts studied were carried out using the Flowsim® software, considering mud as fine material. The models were calibrated with historical data and extraction of 2000 tons of diluent material to be considered as mud. From the set of models, the Block 1 Esmeralda's model was chosen, because it presented the best fit. In this model the spacing of points was varied, whereas the rest of the parameters were considered equal, to note that smaller layouts presents more interaction and extracts less diluent material, compared to a larger layout.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Primero, agradecer a mi madre, quien a pesar de todos los obstáculos que hemos tenido en esta vida siempre ha estado para apoyarme en mis locuras, mis proyectos, mis errores y todo lo que decida en mi vida, sin tu apoyo nada de esto sería posible. Este logró es tuyo porque yo soy el reflejo de la gran madre que eres.*

*Mis hermanos, Diego y Marcelo, quienes me dan cada día su amor y me han enseñado a ser el líder de un gran equipo. Ustedes son mis ojos y el regalo más grande que me pudo entregar la vida.*

*A mi compañera, mi amiga, mi polola y el amor de mi vida, Romina, me has entregado un apoyo imprescindible en todo este proceso. Tu cariño, paciencia y tus palabras me alegran cada día y han sido vitales. Gracias por ser mi complemento perfecto.*

*A mi familia, gracias a cada uno por ser parte de mi formación con una palabra, cariño, buenos y malos momentos, han marcado un aspecto de mi vida y por eso siempre están en mi corazón: Mamiquel, Mi Lilita, Mi Nena, Rosita, Carin y todos lo que se me quedan en el tintero.*

*A los miembros de la comisión, por su apoyo y consejos que ayudaron en la realización de esta investigación. Todo este tiempo con ustedes fue muy grato, gracias por sus palabras y sus críticas constructivas que me ayudaron a mejorar como profesional y persona. Gracias Javier Cornejo, Mauricio Meléndez y Sebastian Lopez.*

*A División El Teniente, CODELCO Chile, quienes facilitaron la información utilizada en esta investigación. Y además me apoyaron y creyeron para que pudiera cumplir con mi Título.*

*Al profesor Raúl Castro y BCTEC, por todo el apoyo brindado durante la realización de mi trabajo de título y la buena disposición para facilitar y enseñar a utilizar el software Flowsim®.*

*A los profesionales de la superintendencia de planificación minero metalúrgica de la División El Teniente por su buena acogida y la buena disposición cada vez que necesite información o alguna ayuda.*

*A mis amigos de Universidad, personas que se destacaron por su simpleza, valores, capacidad, simpatía y sobre todo por su amistad incondicional. Gracias por ayudarme a llevar de mejor manera estos años de esfuerzo y sacrificio. Gracias totales por cruzarse en mi camino: Felipe S., Rodolfo M., Pablo V., Cristian V., Javiera O., Tomás G., Manuel R., Ángel B., Rodrigo D., Kevin F.*

*A mis amigos de la vida, con quienes he vivido muchas aventuras y han sido parte de este proceso, a pesar que la distancia nos ha separado un poco, siempre nos reencontramos en mi querido Cauquenes para revivir nuestros tiempos de colegio. Gracias Sergio V., Miguel G., Juan P. y José M.*

*Somos el producto de las personas que marcan nuestras vidas...*

*A mi familia, mi pareja y  
la memoria de Mi Nena...*

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	Objetivo general .....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
1.3	Alcances .....	2
1.4	Metodología .....	3
2	ANTECEDENTES .....	5
2.1	Mina El Teniente .....	5
2.1.1	Generalidades .....	5
2.1.2	Sectores productivos Mina Subterránea .....	5
2.1.3	Sectores a estudiar .....	6
2.2	Concepto del agua barro .....	8
2.3	Factores que afectan el ingreso de agua barro .....	10
2.3.1	Factores de entorno .....	10
2.3.1.1	Altura in situ .....	10
2.3.1.2	Altura primario .....	11
2.3.1.3	Altura a la topografía .....	11
2.3.1.4	Estación del año .....	11
2.3.1.5	Bajo zona de riesgo y canalón .....	11
2.3.1.6	Tipo de roca o fragmentación .....	12
2.3.1.7	Contaminación vertical y lateral .....	12
2.3.2	Factores operacionales .....	14
2.3.2.1	Razón de extracción .....	14
2.3.2.2	Uniformidad .....	14
2.3.2.3	Velocidad de extracción .....	15
2.3.2.4	Drenaje .....	16
2.3.2.5	Tiraje aislado .....	16
2.4	Casos de faenas en el mundo con presencia de agua barro .....	16
2.4.1	IOZ y DOZ Indonesia .....	18
2.4.2	División el Teniente, Codelco .....	19

2.5	Teorías de Flujo gravitacional .....	20
2.5.1	Teoría de flujo gravitacional aplicadas al diseño .....	20
2.5.2	Modelos de matemáticos de flujo gravitacional .....	24
2.5.2.1	Autómatas Celulares .....	24
2.5.2.2	Balance y conservación de masa .....	24
2.6	Modelos de Mezcla .....	25
2.6.1	Modelo de mezcla de Laubscher .....	25
2.7	Modelo de mezcla mediante simulación.....	26
2.8	Metodología modelo de regresión logística (extracto Memoria Pérez (2017)) .....	27
2.9	Flowsim® .....	30
2.9.1	Funcionamiento FlowSim® .....	31
3	ANÁLISIS DE FACTORES QUE AFECTAN LA CONTAMINACIÓN POR BARRO. ...	34
3.1	Altura de Roca primaria.....	34
3.2	Altura a la topografía y canalón.....	36
3.3	Fragmentación .....	40
3.4	Barro en sectores superiores .....	40
3.5	Uniformidad.....	41
3.5.1	Contaminación Vertical .....	41
3.5.2	Contaminación Lateral .....	42
3.6	Secuencia de Incorporación .....	43
3.7	Análisis de resultados .....	47
4	ANÁLISIS DE LA MALLA DE EXTRACCIÓN.....	49
4.1	Contaminación vertical .....	49
4.2	Contaminación lateral .....	50
4.2.1	Puntos uniformes .....	51
4.2.2	Puntos no uniformes .....	52
4.3	Puntos declarados limitados.....	52
4.4	Análisis de resultados .....	53
5	MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA.....	55
5.1	Análisis Univariable .....	57
5.2	Análisis multivariable .....	58
5.2.1	Análisis de modelos.....	59

5.3	Análisis del modelo seleccionado .....	60
5.4	Casos ficticios para determinar el peso de las variables.....	62
5.5	Análisis de resultados .....	64
6	MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJO .....	65
6.1	Selección del clúster .....	65
6.2	Parámetros del modelo.....	66
6.2.1	Modelo de bloques .....	66
6.2.2	Dimensiones de la batea .....	67
6.3	Calibración del modelo .....	68
6.4	Pruebas para puntos .....	72
6.5	Análisis de resultados .....	72
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
7.1	Recomendaciones y trabajos futuros .....	74
8	Bibliografía.....	76
Anexo A	ALTURA DE ROCA INSITU .....	79
Anexo B	FRAGMENTACIÓN SECTORES .....	81
Anexo C	CONTAMINACIÓN VERTICAL.....	82
Anexo D	CONTAMINACIÓN LATERAL .....	84
Anexo E	PUNTOS BAJO BARRO.....	86
Anexo F	MATRIZ DE CORRELACIÓN.....	87
Anexo G	ADICIÓN DE VARIABLES CON POCA SIGNIFICANCIA.....	89
Anexo H	SELECCIÓN DE CLÚSTER PARA SIMULACIÓN .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variables consideradas y no consideradas en el estudio.....	3
Figura 2: Metodología general. ....	4
Figura 3: Ubicación e ingreso a la mina El Teniente, desde la ciudad de Rancagua ( <i>Fuente: Google Earth</i> ). ....	5
Figura 4: Sectores a estudiar con sus diferentes malla de extracción.....	7
Figura 5: Puntos de extracción RENO sector sur con área de influencia 260 m <sup>2</sup> . ....	8
Figura 6: Elementos para un escurrimiento o bombeo de agua barro. ....	9
Figura 7: Tipos de barros, a la izquierda barro fluido y a la derecha barro viscoso (Jakubec et al, 2013).....	9
Figura 8: Contaminación Vertical y lateral. ....	13
Figura 9: Contaminación lateral en altura. ....	13
Figura 10: Esquema de un punto (rojo) y sus seis vecinos (azul). ....	14
Figura 11: (a) ubicación distrito minero PT Freeport Indonesia. (b) distribución minas PT Freeport Indonesia. (Samosir et al, 2008). ....	18
Figura 12: Clasificación de barro para PT Freeport, (Samosir et al, 2008).....	19
Figura 13: Matriz de criticidad DET. ....	20
Figura 14: Modelo de Janelid y Kvapil (Arce, 2002).....	21
Figura 15 Superposición de elipsoides de extracción (Arce, 2002) ....	22
Figura 16: Determinación altura de interacción (HIZ) según Laubscher. (Arce, 2002). ....	22
Figura 17: Determinación altura de interacción (HIZ) Kvapil (1992). ....	23
Figura 18: Efecto de la fragmentación diferenciada en altura en la geometría del IEZ (Vargas, 2010).....	23
Figura 19: Factor de control de tiraje (Laubscher, 1994).....	26
Figura 20: Modelo volumétrico de mezcla con PED=60% (Laubscher, 1994) ....	26
Figura 21: Ejemplo de la metodología para la construcción de modelos de regresión logística multivariable. (a) Modelo con variables significantes. (b) Modelo con variables significantes más una variable eliminada preliminarmente. (c) Evaluación de los betas de la variables significantes en ambos modelos. (d) Eliminación definitiva de la variable si no cumple el criterio de variación de betas. ....	29
Figura 22: Representación del espacio y estado (Gonzalez, 2014).....	31
Figura 23: Diagrama selección bloque superior que se transformará en vacío (Fuentes, 2015)...	32
Figura 24: Distribución alturas de roca primaria de sectores en estudio.....	34
Figura 25: Distribución alturas de roca primaria de puntos contaminados. ....	35
Figura 26: Altura de roca primaria puntos contaminados por barro. ....	36
Figura 27: Alturas de puntos de extracción a la topografía. ....	37
Figura 28: Puntos contaminados por barro y su distancia a la topografía. ....	38
Figura 29: Canalón y flujos de aguas para el sector Reservas Norte. ....	38
Figura 30: Canalón y flujos de aguas para el sector Diablo Regimiento. ....	39
Figura 31: Canalón y flujos de aguas para el sector Esmeralda Bloque 1.....	39
Figura 32: Canalón y flujos de aguas para el sector Esmeralda antiguo. ....	39

Figura 33: (A) Puntos contaminados y no contaminados por barro. (B) Fragmentación puntos contaminados por barro. ....	40
Figura 34: Puntos contaminados por barro y si poseen un sector superior contaminado por barro. ....	41
Figura 35: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, Esmeralda bloque 1.....	42
Figura 36: Esquemas de contaminación lateral. (A) contaminación lateral asociada a un punto. (B) Contaminación lateral en altura.....	42
Figura 37: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, Esmeralda Bloque 1.....	43
Figura 38: Puntos declarados barro con su porcentaje de extracción y el año en que fue incorporado, RENO sector Norte. ....	44
Figura 39: Estado de los puntos año a año, con la fecha de declaración de barro y su porcentaje de extracción.....	47
Figura 40: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos contaminados por barro verticalmente, según tipo de malla. ....	50
Figura 41: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos contaminados por barro lateralmente, según tipo de malla y uniformidad mayor al 90%. ....	51
Figura 42: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos contaminados por barro lateralmente, según tipo de malla y uniformidad menor al 90%. ....	52
Figura 43: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos declarados limitados, según tipo de malla. ....	53
Figura 44: Transformación fragmentación variable binaria. ....	56
Figura 45: Variables a considerar en el modelo de regresión logística. ....	57
Figura 46: Porcentaje de aciertos del modelo. (a) aciertos puntos barro. (b) aciertos globales. ...	62
Figura 47 Probabilidad ingreso barro variando el tipo de malla. ....	63
Figura 48: Probabilidad ingreso barro variando la fragmentación. ....	63
Figura 49: Puntos seleccionados malla 17[m]x20[m], Diablo Regimiento.....	65
Figura 50: Puntos seleccionados malla 15[m]x20[m], Bloque 1 Esmeralda.....	65
Figura 51: Puntos seleccionados malla 15[m]x17[m], Esmeralda antiguo. ....	66
Figura 52: Modelo de bloques para la simulación. (A) vista isométrica. (B) perfil y-z, (C) vista x-y (superior). Color rojo barro, color azul mineral. ....	67
Figura 53: Parámetros de la batea.....	68
Figura 54: Tonelaje de dilución extraído malla 17[m]x20[m] .....	69
Figura 55: Tonelaje de dilución extraído malla 15[m]x20[m]. ....	70
Figura 56: Tonelaje de dilución extraído malla 15[m]x17[m]. ....	70
Figura 57: Interacción de los elipsoides. (A) malla 15[m]x17[m]. (C) malla 15[m]x20[m]. (C) malla 17[m]x20[m]. ....	71
Figura 58: ingreso de dilución por tipo de malla. (A) malla 15[m]x17[m]. (C) malla 15[m]x20[m]. (C) malla 17[m]x20[m]. ....	72
Figura 59: Distribución alturas de roca Insitu de sectores en estudio. ....	79
Figura 60: Distribución alturas de roca Insitu de puntos contaminados.....	80
Figura 61: Fragmentación sectores en estudio. ....	81
Figura 62: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, DR.....	82

Figura 63: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, RENO. ....	82
Figura 64: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, Esmeralda antiguo. ....	83
Figura 65: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, DR.....	84
Figura 66: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, Diablo Regimiento.....	84
Figura 67: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, Esmeralda antiguo. ....	85
Figura 68: distribución de los puntos que estan bajo barro. ....	86
Figura 69: Alturas extraídas puntos a simular Esmeralda antiguo. ....	91
Figura 70: Alturas extraídas puntos a simular Esmeralda bloque 1. ....	92
Figura 71: Alturas extraídas puntos a simular Diablo Regimiento. ....	92
Figura 72: Uniformidad puntos a simular Esmeralda antiguo.....	93
Figura 73: Uniformidad puntos a simular Esmeralda bloque 1.....	93
Figura 74: Uniformidad puntos a simular Esmeralda antiguo.....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de mallas de los diferentes sectores con datos disponibles en DET.....	6
Tabla 2: Índice específico de uniformidad (Susaeta A. , 2004) .....	15
Tabla 3: Faenas en el mundo con eventos de agua barro (Pérez, 2017).....	17
Tabla 4: Calificación cualitativa de los puntos de extracción. ....	19
Tabla 5: Estados de puntos de extracción DET referidas al agua barro (Navia Moreno, 2014)...	20
Tabla 6: Estadísticas básicas de la altura de roca primaria puntos contaminados por barro. ....	36
Tabla 7: Proporción puntos contaminados por barro. ....	40
Tabla 8: Parámetros a considerar para evaluar la influencia de la malla de extracción. ....	49
Tabla 9: Media y mediana puntos contaminados verticalmente por tipo de malla. ....	50
Tabla 10: Media y mediana puntos contaminados lateralmente uniformes por tipo de malla. ....	51
Tabla 11: Media y mediana puntos contaminados lateralmente no uniformes por tipo de malla. .	52
Tabla 12: Media y mediana puntos declarados limitados por tipo de malla. ....	53
Tabla 13: Variables operacionales y su forma considerada en el modelo.....	55
Tabla 14: Cantidad de datos seleccionada para el modelo de regresión logística.....	56
Tabla 15: Análisis univariable de los factores estudiados.....	58
Tabla 16: Variables a utilizar en los modelos a probar. ....	58
Tabla 17: Resultados modelo 1. ....	59
Tabla 18: Resultados modelo 2. ....	60
Tabla 19: Resultados modelo 3. ....	60
Tabla 20: Sectores para validar el modelo.....	61
Tabla 21: Casos ficticios a analizar. ....	62
Tabla 22: Características de los modelos de bloques. ....	67
Tabla 23: Parámetros de la batea por tipo de malla a simular.....	68
Tabla 24: Parámetros calibrados de FlowSim®. ....	69
Tabla 25: Características puntos simulados.....	69
Tabla 26: Pruebas para el modelo malla 15[m]x20[m], para todos los tipos de malla. ....	72
Tabla 27: estadísticas básicas de la altura de roca primaria puntos contaminados por barro.....	80
Tabla 28: Matriz de correlación todos los datos utilizados. ....	87
Tabla 29: Matriz de correlación, datos barro de Diablo Regimiento. ....	87
Tabla 30: Matriz de correlación, datos barro bloque 1 Esmeralda. ....	88
Tabla 31: Matriz de correlación, datos barro de Reservas Norte. ....	88
Tabla 32: Matriz de correlación, datos barro de Esmeralda antiguo. ....	88
Tabla 33: Variación de parámetros, con la incorporación de la malla y fragmentación. ....	89
Tabla 34: Características puntos a simular Esmeralda antiguo. ....	90
Tabla 35: Características puntos a simular Esmeralda bloque 1. ....	90
Tabla 36: Características puntos a simular Diablo Regimiento. ....	91
Tabla 37: Características puntos a simular Esmeralda antiguo. ....	91

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 : Índice de Uniformidad.....	14
Ecuación 2: Punto entrada de dilución .....	25
Ecuación 3: Variable binaria para el modelo de regresión logística. ....	28
Ecuación 4: Probabilidad del modelo de regresión logística multivariable. ....	28
Ecuación 5: Probabilidad modelo de regresión logística univariable.....	28
Ecuación 6: Probabilidad del modelo de regresión logística multivariable. ....	29
Ecuación 7: Función de verosimilitud. ....	30
Ecuación 8: Función de verosimilitud, forma 2. ....	30
Ecuación 9: Logaritmo función de verosimilitud. ....	30
Ecuación 10: Condiciones de borde función de verosimilitud. ....	30
Ecuación 11: Condición para espacios vacios.....	32
Ecuación 12: Función de probabilidad de FlowSim®.....	32
Ecuación 13: Modelo de regresión logística seleccionado. ....	61

# 1 INTRODUCCIÓN

El Block/Panel caving corresponde a un método de explotación por hundimiento, donde el cuerpo mineralizado fluye hacia los puntos de extracción por acción de la gravedad. Para lograr esto, se genera un vacío en la base de la columna mineralizada, ya sea por la socavación o la extracción, el cual se va rellenando con material proveniente de niveles superiores (por acción de la gravedad). Esto permite que material que no sea de interés económico (dilución) ingrese a los puntos de extracción de acuerdo a como avance la extracción.

La dilución en un método de panel caving se debe principalmente a la incorporación de puntos de extracción desfasados en el tiempo, la ausencia de uniformidad en la extracción y el material diluyente en las cercanías de los puntos. Una forma de dilución es el barro, que hoy en día es considerado de gran importancia para las operaciones mineras, debido a que presenta un alto riesgo para la seguridad de las personas (bombeos y escurrimientos) (Jakubec et al, 2013), complejidad de tratamiento de minerales con barro y pérdidas de reservas, por el cierre de puntos.

Butcher (et al, 2000), define los bombeos o escurrimientos de barro como la salida violenta de barro a través de un punto de extracción. El mismo autor, establece para que se produzca el fenómeno es necesaria la presencia de agua, material fino, un punto de descarga y alguna perturbación.

Los bombeos o escurrimientos, son una incertidumbre hasta la fecha, ya que no existe el conocimiento para determinar el momento exacto donde puede ocurrir el fenómeno, ante lo cual la División el Teniente de Codelco (DET) la ha catalogado dentro de las diez incertidumbres más relevantes que afectan el negocio minero, por ende se hace necesario comprender y controlar el fenómeno (Guzmán, 2017).

Durante la historia de DET se ha observado y analizado distintos factores que tienen incidencia en el ingreso de agua barro en los puntos de extracción. El estudio de estas variables ha ido enfocado directamente a controlar el problema del agua barro de manera operacional o con infraestructura complementaria, de tal forma que permita filtrar, disminuir o retrasar el ingreso de agua a los sectores productivos.

## 1.1 Motivación

El barro es un riesgo crítico dentro de las operaciones mineras explotadas por métodos de hundimiento, ya que es un fenómeno que ha afectado la vida e integridad de las personas, produciendo pérdidas humanas, equipos e infraestructura. Por este motivo, varios autores han estudiado las diferentes variables que afectan el fenómeno, obteniendo parámetros o factores muy conocidos en la influencia del fenómeno. No obstante, hasta la fecha ninguno de los estudios ha considerado la influencia de los diseños, a pesar de que Butcher ( et al, 2000) menciona que los espaciamientos entre puntos de extracción tienen influencia en el fenómeno, debido a la interacción de los elipsoides.

Para las mallas de extracción, actualmente, en la DET y en muchas otras operaciones mineras a lo largo del mundo, se diseña privilegiando la estabilidad y los equipos por sobre otras variables, quedando en segundo plano los efectos del diseño en el ingreso de dilución, en particular, en la contaminación de puntos de extracción por agua barro.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general de este estudio es analizar los efectos de distintas mallas de extracción en el ingreso de agua barro en la División El Teniente de Codelco mediante un análisis retrospectivo de distintos sectores de la mina.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para cumplir con el objetivo general es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos, que están enfocados en las tareas a desarrollar:

- Analizar estadísticamente las diferentes variables que influyen en la contaminación por agua barro
- Generar un modelo analítico de las variables de mayor importancia en el problema
- Generar un modelo numérico de flujo gravitacional para los diferentes tipos de mallas

## **1.3 Alcances**

El trabajo de título está enfocado en determinar la influencia del diseño minero en la contaminación de puntos extracción por agua barro, para lo cual se utilizarán diferentes sectores la mina El Teniente, que posean distintos espaciamientos entre puntos y que posean puntos contaminados por barro.

Se estudiarán los puntos en estado barro, no barro y limitados, hasta la fecha de diciembre del 2017. Además, se considerará la primera declaración por barro o en estado limitado y que el punto en esa fecha deja de ser explotado. Se realizarán los análisis por separados para los estados barro y limitados.

Se analizará estadística y gráficamente gran parte de los factores que influyen en la contaminación por barro, la Figura 1 presenta las variables a considerar y las a omitir dentro del estudio.



**Figura 1: Variables consideradas y no consideradas en el estudio.**

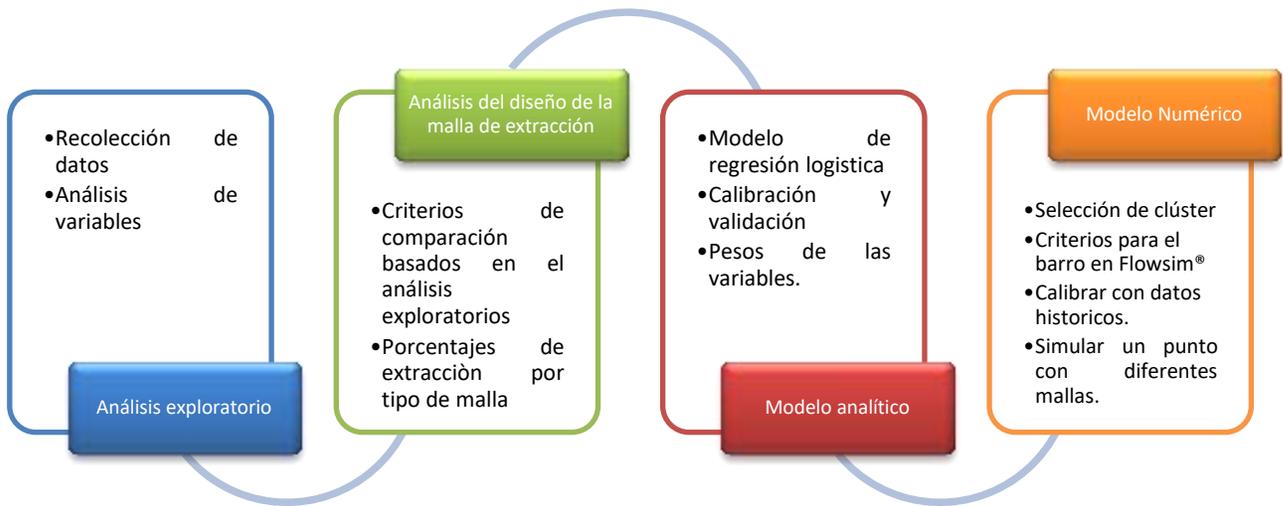
Para el modelo analítico, se construirá un modelo de regresión logística con los sectores estudiados y que las variables incorporadas al modelo tengan relevancia física y estadística. Además, se busca determinar, la relevancia de la malla en el ingreso de agua barro con el uso del modelo.

El modelo numérico, se realizará mediante simulaciones de flujo gravitacional con el software Flowsim®, donde se simulará un clúster de puntos por tipo de malla de extracción. Estos puntos tendrán una calibración con los datos históricos, para luego correr pruebas por clúster variando el espaciamiento. En este trabajo, no se validarán los modelos solo serán utilizados para correr pruebas con diferentes mallas de extracción.

#### **1.4 Metodología**

La estructura del trabajo se divide en cuatro etapas, las que se ilustran en la Figura 2. La primera etapa está basada en análisis estadístico de las principales variables que afectan la contaminación por barro, basándose en la historia de DET. Para luego, establecer criterios que permitan aislar la variable de diseño y poder comparar mallas con el ingreso de barro.

Las últimas dos etapas están enfocadas en replicar el análisis de la historia de DET, en un modelo analítico y en un modelo numérico, de manera de establecer modelos que se ajusten al fenómeno en El Teniente.



**Figura 2: Metodología general.**

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Mina El Teniente

#### 2.1.1 Generalidades

La mina El Teniente (o División El Teniente, DET) es un complejo minero-metalúrgico ubicado en la Cordillera de Los Andes de Chile Central, comuna de Machalí, Provincia del Cachapoal, en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, aproximadamente a 40 km al NE de Rancagua y 73 km al SE de Santiago. Sus coordenadas geográficas son 70°21' longitud oeste y 34°14' latitud sur, con una elevación entre 2000 y 3200 m s.n.m. El acceso a la mina desde Rancagua, se realiza por la carretera del cobre por aproximadamente 58 km hasta el ADIT 71, Figura 3.

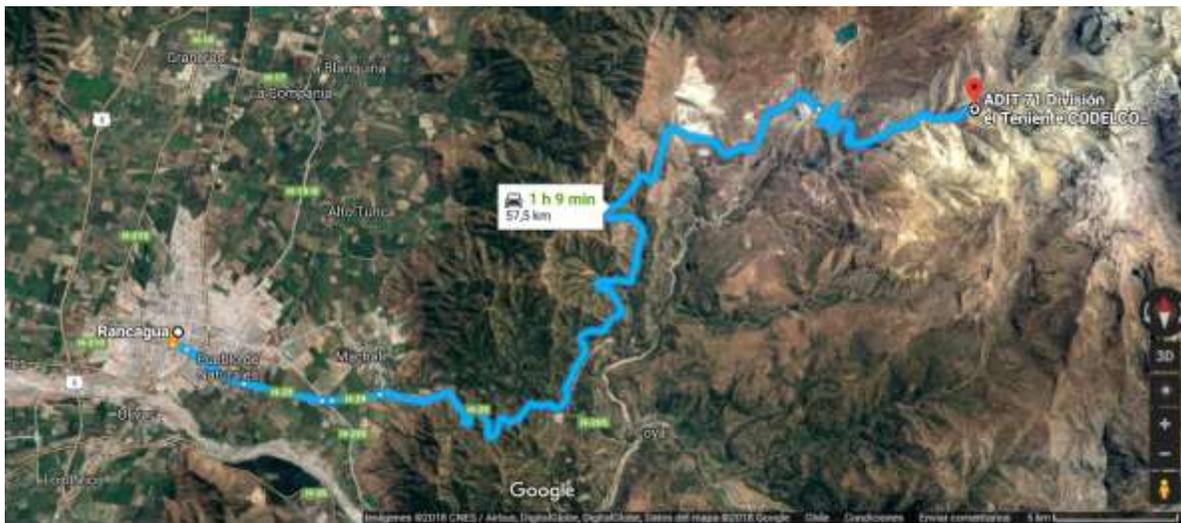


Figura 3: Ubicación e ingreso a la mina El Teniente, desde la ciudad de Rancagua (Fuente: Google Earth).

El complejo productivo El Teniente considera dentro de sus instalaciones una mina subterránea, una mina a Rajo Abierto, las plantas de beneficio de mineral de Sewell y Colón, la Fundición de Caletones y las instalaciones de infraestructura propias de una explotación minera a gran escala (CODELCO, 2018b). Este sistema productivo tiene una capacidad de procesamiento de 140.000 [tpd] de los cuales 124.000 [tpd] provienen de las labores subterráneas, donde durante el 2017 se alcanzaron 464 [ktmf] de cobre y 6,2 [ktmf] de molibdeno.

#### 2.1.2 Sectores productivos Mina Subterránea

Las labores subterráneas de la DET son explotadas mediante el método de Panel Caving, estas labores actualmente corresponden a 8 sectores (CODELCO, 2018) los cuales según sus cotas, son los siguientes:

- Cotas entre 2200 y 2360
  - Mina Esmeralda Bloque 1 y 2 con extensiones y Panel Esmeralda
  - Mina Diablo Regimiento
  - Mina Pacífico Superior

- Mina Suapi
  - Mina Pipa Norte
- Cotas entre 1880 y 2200:
- Mina Reservas Norte (Reno) y Panel Reservas Norte
  - Mina Dacita
  - Mina Pilar Norte

Los ocho sectores productivos presentan diferentes diseños del nivel de producción, debido a las características de esfuerzos in situ y a los equipos utilizados.

El transporte de mineral se realiza mediante equipos LHDs, los cuales transportan y depositan el mineral en piques de traspaso. Estos entregan el mineral al nivel de transporte intermedio que se realiza mediante correas transportadoras, camiones y ferrocarriles. Finalmente, el transporte principal se realiza en el Teniente 8 donde el mineral es transportado hacia la planta de Colón mediante ferrocarriles.

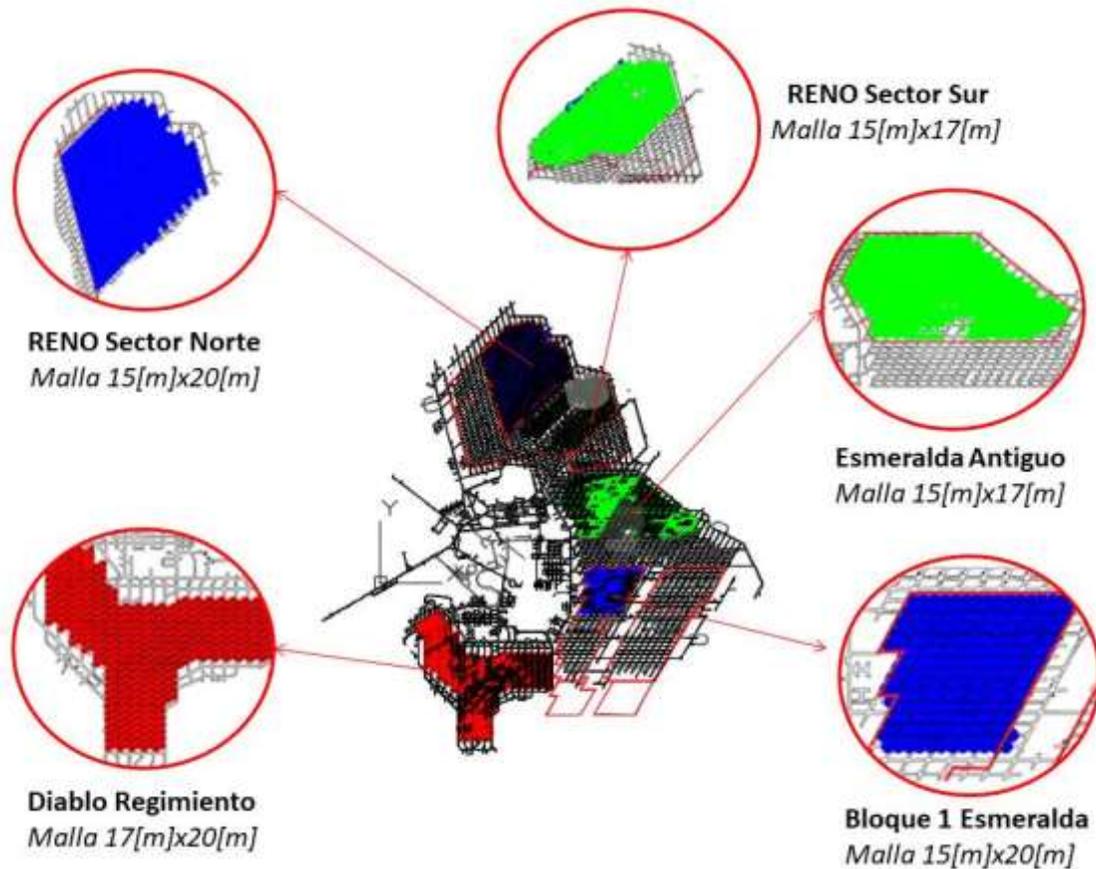
### 2.1.3 Sectores a estudiar

Desde que comenzó la explotación por el método de Panel Caving, DET ha explotado sus diferentes sectores productivos mediante una malla tipo Teniente con diferentes dimensiones dependiendo del sector y los equipos a utilizar. Estas dimensiones utilizadas a lo largo de la historia han sido tres según el área de influencia de cada punto de extracción, 260, 300 y 340 m<sup>2</sup>. La Tabla 1 muestra los diferentes sectores con los que se cuentan datos de extracción hasta diciembre del 2017.

**Tabla 1: Tipos de mallas de los diferentes sectores con datos disponibles en DET.**

Sector	Tamaño malla	Área influencia[m <sup>2</sup> ]
Diablo Regimiento	17[m]x20[m]	340
Dacita	15[m]x20[m]	300
Reservas Norte sector Norte	15[m]x20[m]	300
Reservas Norte sector Sur	15[m]x17[m]	260
Esmeralda Bloque 1	15[m]x20[m]	300
Esmeralda antiguo	15[m]x17[m]	260
Pilar Norte	15[m]x20[m]	300

Debido a los objetivos del trabajo, no es posible seleccionar todos los sectores, ya que se debe tener minas con diferentes mallas de extracción y con un porcentaje razonable de puntos contaminados por barro hasta la fecha de estudio (20% como valor mínimo). Por lo anterior, se identifican cinco sectores para el estudio con los tres tipos de mallas utilizadas en la DET, estos sectores se muestran en la Figura 4.



**Figura 4:** Sectores a estudiar con sus diferentes malla de extracción.

De los sectores estudiados, Reservas Norte y Esmeralda antiguo, requieren una explicación más detallada de la historia del sector, debido a los diferentes diseños en un sector y colapsos a lo largo de su historia, que han afectado que la operación se lleve a cabo de forma regular. Por otra parte, Diablo Regimiento y el Bloque 1 de Esmeralda han presentado características más regulares en su explotación, sin considerar el fenómeno de la contaminación por barro.

Reservas Norte se ha dividido en dos sectores que denominaremos sector Norte y Sur, basados en su ubicación espacial y el diseño de malla. El sector Sur, comenzó su explotación en el año 1989 bajo una compleja topografía, donde cabe destacar que presenta detenciones en la operación regular, debido a colapsos y estallidos de rocas. Además, de estos antecedentes, se tiene que el sector presenta una mezcla de diferentes tipos de mallas con puntos que tienen áreas de influencias superiores a los  $300 \text{ m}^2$ , alcanzando un máximo cercano a los  $500 \text{ m}^2$ . No obstante, mayoritariamente se tienen puntos con  $260 \text{ m}^2$  de influencia, estos se encuentran ubicados de forma “continua” a lo largo del polígono de explotación (ver Figura 5).

El sector Norte de Reservas Norte, comenzó su explotación en el año 2005 como continuación del sector sur, conservando la geometría del frente de hundimiento y accesos. No obstante, la gran diferencia con el sector sur es el aumento de malla de extracción a  $300 \text{ m}^2$  y que su distribución es constante a lo largo del polígono de explotación.

La historia de Esmeralda antiguo comienza con su explotación en el año 1999. Su operación es muy similar a la del RENO sector sur, debido a que también presenta colapsos en sus calles y un

cambio de malla a una de 300 metros cuadrados. Sin embargo, el sector objeto de estudio de este trabajo fue abandonado luego del colapso y el agotamiento de las reservas presentes en los puntos iniciales, sin embargo, presenta extracción suficiente y puntos contaminados barro que hacen al sector relevante para el estudio.

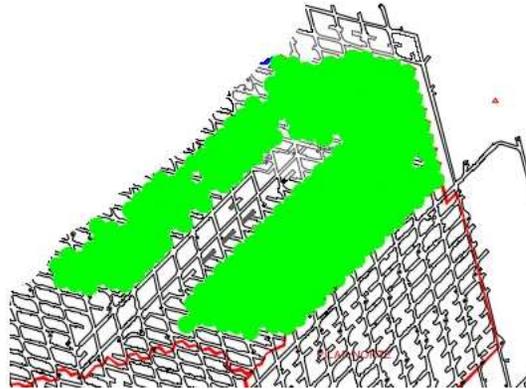


Figura 5: Puntos de extracción RENO sector sur con área de influencia 260 m<sup>2</sup>.

## 2.2 Concepto del agua barro

Agua y material fino son los dos elementos más importantes que contribuyen a la formación de barro (Jakubec et al, 2013), donde el agua juega un rol fundamental, debido a que sin esta no existe el potencial de generar barro, sin embargo su presencia depende de la ubicación de los sectores productivos y la distancia a fuentes de agua. Por otro lado, el material fino se presenta de forma inherente en la minería del panel caving debido a la fricción del material asociada al método.

La presencia de agua barro por sí sola no es un riesgo, debido a que solo es material fino con porcentaje elevado de agua. No obstante, la existencia de barro da paso a otro fenómeno que es el de real riesgo y el que toda empresa minera quiere evitar, ya que atenta contra la seguridad de los trabajadores. Este fenómeno son los bombeos o escurrimientos de agua barro, que se definen como la salida brusca de barro por un punto de extracción (Butcher et al, 2000).

Según Butcher (et al, 2005), se deben conjugar los cuatro elementos de la Figura 6 para que ocurra un bombeo o escurrimiento, donde en la minería del Block/panel Caving, se presentan los cuatro de manera natural, donde la única variación es la proporción de finos y el porcentaje de agua.

Según casos de estudios en PT Freeport Indonesia, los bombeos pueden ocurrir cuando más del 30% del material presenta un tamaño menor a 5 [cm] y una humedad mayor al 8.5% (Samosir et al, 2008).



**Figura 6: Elementos para un escurrimiento o bombeo de agua barro.**

Al analizar una serie de bombeos y escurrimientos de agua barro, Jakubec (et al, 2013), clasifico los tipos de barros según el porcentaje de agua presente en su composición. De esto obtuvo dos categorías, los barros fluidos y los barros viscosos.



**Figura 7: Tipos de barros, a la izquierda barro fluido y a la derecha barro viscoso (Jakubec et al, 2013)**

### **Barro fluido**

Este tipo de barro presenta un contenido de agua sobre el 50%, se asemeja más a una descarga de agua que a un fluido de barro y es capaz de fluir por la acción de la gravedad. Según registros, puede recorrer distancias por sobre los 500 metros y llevar a su paso rocas con un tamaño de hasta 3 metros (Jakubec et al, 2013).

### **Barro viscoso**

El barro viscoso presenta un contenido de agua entre el 17 y 23%, no fluye por acción de la gravedad, pero cuando es sometido a esfuerzos y a ciertas condiciones puede ser expulsado fuera de un punto de extracción. Debido a, la alta viscosidad del conglomerado puede ser muy destructivo generando daños severos a la infraestructura y personas (Jakubec et al, 2013).

Por otro lado, según Butcher (et al, 2000) es posible definir el barro en base a su fuente de generación, que puede ser interna o externa. La generación interna es producida por finos asociados a la conminución de contacto roca-roca o alguna fuente producida subterráneamente, en cambio, la generación externa es producida por la incorporación de finos o barro a través de superficie, como por ejemplo relaves y barro por el cráter de subsidencia.

Independiente del tipo de barro que se produzca las consecuencias en el negocio minero son desastrosas, debido a que atentan contra la seguridad de las personas, infraestructura y equipos. Además, generan un gran daño al negocio minero, ya que se pierden reservas que originalmente estaban contempladas en el plan de producción (Navia, 2014), disminuyendo la vida de la mina y sus utilidades.

### **2.3 Factores que afectan el ingreso de agua barro**

Como se apreció en la sección 2.2, para que se produzca un evento de agua barro es necesario se presenten cuatro elementos generadores. Estos elementos en la minería del block/panel caving están siempre presentes, debido a que el método tiene las siguientes características

- Potencial de generar finos, debido al contacto roca-roca,
- La presencia de napas subterráneas o el cráter de subsidencia permiten el ingreso de agua,
- La extracción es la principal perturbación, y
- Los niveles de producción son el principal punto de descarga.

Lo anterior genera la pregunta ¿Qué factores o variables alteran que la contaminación por barro se produzca antes o después?

Hasta la fecha, existen varios factores estudiados que contribuyen en la contaminación por barro de los puntos de extracción. Estas variables se pueden clasificar en de entorno, relacionado directamente con el espacio físico donde se encuentra ubicado el nivel de producción, y las operacionales, referidos a la operación misma de la mina.

#### **2.3.1 Factores de entorno**

Los factores de entorno reflejan las condiciones naturales de la ubicación de la mina, donde según las características del sector se acelerará o retrasará el ingreso de barro.

Butcher (et al, 2000), Butcher (et al, 2005), Navia (2014), Pérez (2017) y BCTEC (2018) han mencionado como afectan estos factores de entorno en el ingreso de agua barro. Los cuales se enuncian a continuación.

##### **2.3.1.1 *Altura in situ***

Es la altura de columna de mineral primario y secundario sin fragmentar, medida desde el punto de extracción. Esta variable entrega una idea de la distancia hacia el material fragmentado o una posible fuente de barro, si es que existen flujos de agua a dicho sector, sobre los puntos de extracción. Por ende, alcanzar dicha altura aumentaría la probabilidad de ingreso de barro. Sin embargo, mayores alturas retardarían el ingreso de agua barro, debido a un mayor tiempo de conexión con el fino o barro en sector superior.

Cabe mencionar que a medida que la minería se profundiza el mineral secundario disminuye, siendo mayoritariamente mineral primario.

### **2.3.1.2 *Altura primario***

Es parte de la columna in situ (su relación es muy similar), es la altura desde el punto de extracción hasta el contacto de mineral primario con secundario.

El mineral secundario presenta mayor permeabilidad que la roca primaria, generando el contacto entre ambos tipos de rocas, una zona de acumulación de agua. Dicha agua puede hacer ingreso a los puntos de extracción al alcanzar la altura de primario, que combinado con el material fino, producto de la minería, aumenta la probabilidad de agua barro. Sin embargo, mayores alturas de columna de primario disminuyen la probabilidad del ingreso de agua barro, ya que la conexión con la fuente de agua y fino tarda más que una columna con altura menor.

### **2.3.1.3 *Altura a la topografía***

Es la distancia vertical desde el punto de extracción hasta la superficie topográfica. Los puntos que presentan una menor altura a la topografía tienen una mayor probabilidad de que los flujos de agua se acumulen o se transporten por sobre ellos. Esto genera que los puntos de extracción bajo estas zonas, posean un mayor flujo de agua disponible hacia los niveles productivos.

### **2.3.1.4 *Estación del año***

Tiene relación con las precipitaciones o el flujo de agua disponible en superficie para el ingreso a la columna de extracción. Estos flujos de aguas varían según la condición climática del sector donde este emplazada la mina, debido a que en la alta montaña los mayores flujos de agua se producirán en las épocas de verano por los deshielos, en cambio, en faenas donde existen solo lluvias los mayores flujos serán en las épocas de invierno o de lluvia abundante.

A pesar de que las estaciones del año están relacionadas con las precipitaciones, no son una variable directa en la contaminación. Debido a que sectores antiguos o algunos tipos de rocas pueden acumular agua, luego ser fuente para algunos puntos de acuerdo a cómo se realice la extracción (Navia, 2014).

Jakubec et al (2013), también menciona que al ir profundizándose la mina aumentan los tiempos de retención de agua por parte del quebrado y antiguos niveles productivos.

A pesar de estos enunciados, que la estación del año no es un factor relevante, existe evidencia en DET, que en las épocas de mayores flujos de agua aumentan los puntos contaminados por barro (Pérez, 2017).

### **2.3.1.5 *Bajo zona de riesgo y canalón***

Los puntos con menor altura topográfica generan una zona de acumulación de agua, denominada canalón (BCTEC, 2018). Esta zona afecta directamente el ingreso de barro, ya que es una fuente constante de agua hacia los niveles de producción.

La DET ha definido una zona de riesgo de ingreso de agua barro que incorpora la presencia del canalón, sectores superiores con presencia de barro y la proyección de las cuencas hacia los niveles productivos.

BCTEC (2018), determino que más del 60% de los puntos con ingreso de agua barro (para dos sectores de la Mina el Teniente) se encontraban bajo la zona de riesgo. Es decir, los puntos de extracción bajo la zona de riesgo tienen un alto potencial de estar contaminados por barro, debido a que el sector tendrá una un aporte mayor de agua desde las cuencas superficiales.

La utilización de la zona de riesgo, es conservadora, debido a que considera que todo lo que está bajo la zona de riesgo está contaminado por barro (Pérez, 2017), lo que en la realidad no es así, ya que, también influyen otros variables.

La zona de riesgo y canalón se definen en base a geología, sin embargo, tiene el mismo sentido físico considerar la altura a la topografía, ya que las tres variables describen el mismo fenómeno, que es una fuente de agua en superficie.

### ***2.3.1.6 Tipo de roca o fragmentación***

Butcher (et al, 2005), enuncio que el material fino es fundamental para la generación de barro, es por este motivo que el tipo de roca se hace importante en el fenómeno, debido a que tiene una relación directa con la granulometría, por ende dependiendo del tipo de roca se tendrá material grueso o fino, por ende una menor o mayor probabilidad de contaminación, respectivamente.

Por otro lado, también influye la altura de extracción, ya que a medida que se avanza en la columna de extracción, esta variable entra a tomar relevancia la fragmentación secundaria (Montecino, 2011), que es la reducción del mineral por la fricción con el material de la columna de extracción.

### ***2.3.1.7 Contaminación vertical y lateral***

El fenómeno de agua barro no es de carácter aislado, sino que es mayoritariamente de carácter zonal, ya que existe una relación entre un punto contaminado y sus vecinos (Navia, 2014). Es decir, la contaminación del primer punto, de la vecindad, influye en que puntos contiguos se contaminen, debido a una migración lateral del barro. Es por este motivo, que la contaminación de los puntos se puede definir como vertical o lateral.

Muchos autores definen la contaminación de barro vertical de un punto como aquel que fue el primero en contaminarse con respecto a sus vecinos. De la Figura 8, se puede desprender que un punto contaminado verticalmente es aquel que alcanza una fuente de barro por sobre su altura de roca Insitu o primario, es decir conecta con una cavidad o sector con barro.

De lo anterior y la Figura 8 (e), se deduce que un punto contaminado lateralmente es aquel que se produjo posterior a la contaminación vertical y que su dilución (barro) está asociado a la migración del barro del primer punto contaminado.

Sin embargo, con la definición anterior existen puntos contaminados verticalmente que presentan un porcentaje de extracción muy menor al 100% de la columna de roca primaria (que es fuente de ingreso vertical más cercana), esto indicaría que el barro ingreso antes de alcanzar el material quebrado sobre la roca primaria, por ende algún punto contribuyo al ingreso lateral de barro.

Por la anterior razón, para este estudio, se define una nueva condición para un punto contaminado verticalmente y es que su porcentaje de extracción sea al menos del 100% de la columna de roca primaria.

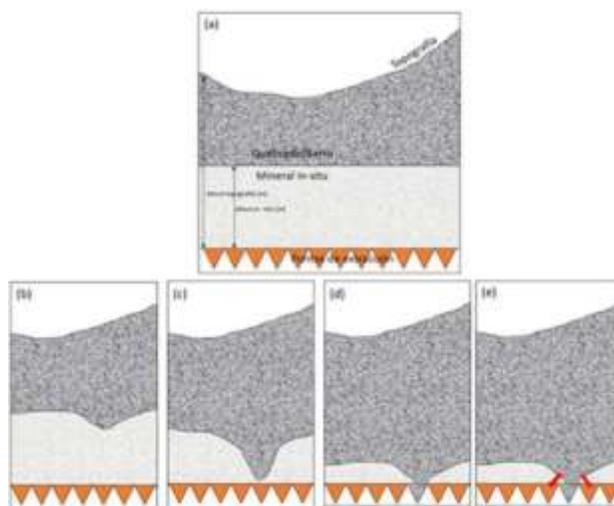


Figura 8: Contaminación Vertical y lateral.

Por otro lado, la existencia de puntos contaminados verticalmente, según la definición de la Figura 8, que presentan una altura extraída muy menor a la altura de primario genera la pregunta ¿por qué son verticales?

DeWolfe(1981) advierte que es necesario tener un control adecuado de la extracción, dado que el vacío generado entre el material quebrado y la roca in situ ( air gap), es propicio para el ingreso del material diluyente (material fino sin interés económico) por sobre el quebrado ( ver Figura 9), este fenómeno es denominado “rilling”.

El fenómeno del “rilling” es extrapolable al barro, ya que este presenta una granulometría fina y se asemeja más a un fluido que a material particulado (Jakubec et al, 2013), por ende tiene mayor facilidad de fluir por el air gap, generando la contaminación temprana de puntos sin tener un punto vecino contaminado.

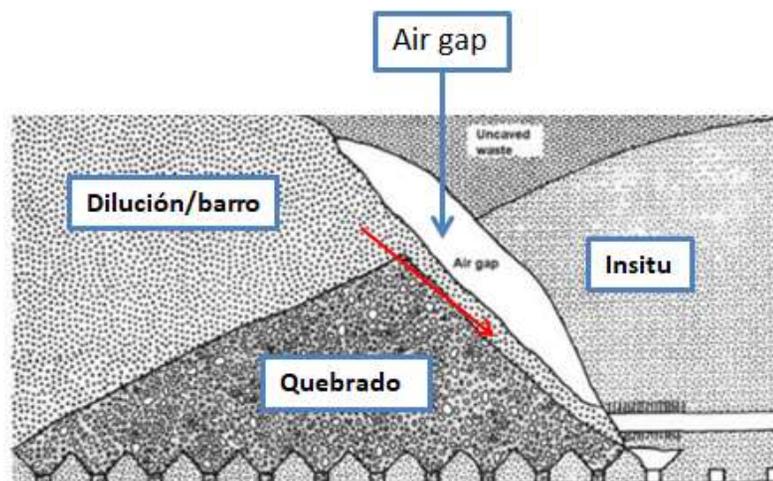


Figura 9: Contaminación lateral en altura.

## 2.3.2 Factores operacionales

La forma en que se opera una faena minera tiene mucha influencia en la contaminación por barro, debido a que una correcta operación permite que la columna mineral baje uniforme y no ingrese de forma prematura el barro o también puede reducir el flujo de agua hacia las labores productivas. Los factores operacionales son los siguientes:

### 2.3.2.1 Razón de extracción

Pérez (2017), mediante un análisis estadístico de datos históricos de la DET determino que a mayor razón de extracción mayor es la probabilidad del ingreso de barro. Esto se debe a que mayor razón de extracción indica una mayor altura extraída, por lo tanto, más cercano se encuentra a las fuentes generadoras de barro o agua, por ende mayor es el riesgo de contaminación.

### 2.3.2.2 Uniformidad

La uniformidad hace referencia al tonelaje extraído por un punto en comparación con sus vecinos, donde se habla de uniformidad si un punto y sus seis vecinos (ver Figura 10) son extraídos con tonelajes muy parecidos (Susaeta, 2014). De esta manera se tendrá que la columna de mineral baje de igual forma en todos los puntos evitando la dilución lateral.

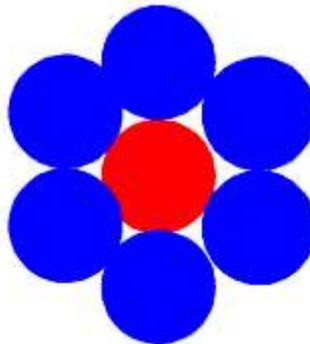


Figura 10: Esquema de un punto (rojo) y sus seis vecinos (azul).

Navia (2014), determino que en una vecindad, los puntos con menor uniformidad, son los que presentan menores alturas de extracción. Además, que si la uniformidad en algunos periodos disminuye mucho, el punto tiene alta probabilidad de ingreso de barro.

Susaeta (2004), planteo el índice de uniformidad (Ecuación 1), que mide la desviación del tonelaje extraído de un punto en comparación con sus vecinos.

$$I. U. = \Delta + \Gamma * \frac{t_p - t_{\min}}{t_{\max}^2 * n} * \sum_{i=1}^n (t_{\max} - t_i)$$

Ecuación 1 : Índice de Uniformidad.

Los términos se describen a continuación:

- $\Delta$ : número de puntos de extracción inactivos en la vecindad del punto estudiado.

- $\Gamma$ : factor de normalización, equivalente a 99/89.
- $t_p$ : tonelaje extraído del punto p en un período específico de tiempo.
- $t_i$ : tonelaje extraído del punto i que se encuentra en la vecindad del punto p en el mismo período de tiempo.
- $t_{m\acute{a}x}$ : tonelaje máximo extraído en la vecindad del punto p en el mismo período de tiempo.
- $t_{m\acute{i}n}$ : tonelaje mínimo extraído en la vecindad del punto p en el mismo período de tiempo.
- n: número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto p, incluyéndolo.

Susaeta (2004), definió el término de la derecha como el índice específico de uniformidad, donde clasifico los posibles valores del índice específico de uniformidad en relación a los vecinos inactivos y le dio la calificación de uniforme (U), semiuniforme (SU) y desuniforme (DU) según corresponda el caso, como se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2: Índice específico de uniformidad (Susaeta A. , 2004)

		Índice Específico de Uniformidad				
		0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
Número de puntos de extracción inactivos	0	U	U	U	SU	SU
	1	U	U	SU	SU	SU
	2	U	SU	SU	SU	DU
	3	SU	SU	SU	DU	DU
	4	SU	SU	DU	DU	DU
	5	DU	DU	DU	DU	DU
	6	DU	DU	DU	DU	DU

Por otra parte, para este trabajo se utilizara el tonelaje extraído uniforme, semiuniforme y desuniforme, basándose en el índice de uniformidad de Susaeta a una escala semanal. Luego, con el tonelaje extraído para cada caso, se calcula el porcentaje del tonelaje extraído, según los tres criterios.

### 2.3.2.3 Velocidad de extracción

Butcher et al (2000) y Navia (2014), mencionan que altas tasas de extracción generan caminos preferenciales en el flujo de mineral hacia los niveles de producción. Además, altas tasas de extracción en puntos ya contaminados por barro, permiten una migración lateral del barro a sus vecinos.

Si bien altas tasas son perjudiciales cuando existe un punto ya contaminado por barro, se requiere que exista un movimiento constante de mineral para que el mineral no se compacte y cause más acumulación de barro (Jakubec et al, 2013). Por este motivo, se requieren que exista una extracción controlada en la vecindad de puntos declarados contaminados, de manera de evitar la propagación lateral del fenómeno.

#### **2.3.2.4 Drenaje**

El drenaje permite controlar la infiltración de agua hacia niveles productivos, debido a que permite captar parte de los flujos superficiales que se dirigen a los puntos de extracción (BCTEC, 2018).

Por otro lado, el drenaje también puede ser asociado a la extracción, ya que como menciona Navia (2014), cuando un punto es contaminado por barro y se continúa con la extracción de los puntos vecinos, permite generar un drenaje del barro o agua hacia su vecindad, retrasando la contaminación de los puntos vecinos.

#### **2.3.2.5 Tiraje aislado**

El tiraje aislado permite que se generen zonas preferenciales de ingreso de agua barro y que su entrada sea antes de lo contemplada. La condición de tiraje aislado puede producirse debido a un mal diseño de las mallas de extracción, o bien estrategias de extracción que no son los suficientes para prevenir esta condición (Butcher et al, 2000).

### **2.4 Casos de faenas en el mundo con presencia de agua barro.**

Los eventos de agua barro han afectado a diversas faenas mineras alrededor del mundo. No obstante, son muy pocos los eventos que han generado muerte de personas o daños considerables a la operación (Jakubec et al, 2013).

Pérez (2017), realizó un resumen de las principales operaciones mineras alrededor del mundo que han sido afectadas por el problema de agua barro (Tabla 3). Estas faenas han tomado una serie de medidas para disminuir la contaminación de reservas por barro y de este modo reducir los eventos de bombeos o escurrimientos de barro. Dentro de las medidas implementadas se pueden destacar las siguientes:

- Construcción de galerías de drenaje.
- Asegurar la Uniformidad de la extracción.
- No se deben permitir altas tasas de extracción en puntos con extracción irregular (Navia (2014) y Butcher et al, (2000)).
- Perforación de drenaje desde los puntos de extracción.
- Definición de estados de puntos de extracción, en base a su contenido de humedad. Donde se restringe o se termina la extracción, dependiendo del punto.
- Seguimiento de las precipitaciones e infiltraciones de agua.
- Utilización de equipos tele comandados.

Esta memoria está enfocada en estudiar el problema en La División el Teniente de Codelco, donde la faena que más se asemeja a su operación, en método, profundidad y puntos con barro, es IOZ y DOZ de PT Freeport Indonesia. Por ende, esta sección le dedicará un mayor análisis a dicha operación.

**Tabla 3: Faenas en el mundo con eventos de agua barro (Pérez, 2017).**

Faena	Ubicación	Descripción
<b>Kimberley y De Beers</b>	Sudáfrica	Son minas de diamantes donde se produce agua-barro debido a la mezcla de Kimberlita que contiene arcillas y esquistos, con agua proveniente de lluvias, con esta mezcla se forma barro. El ingreso del agua es a través de una operación a cielo abierto ubicada en la superficie
Ue	Zambia	Es una mina que se explotó bajo Block Caving y posteriormente mediante Sublevel Caving. Se produjo una irrupción de relaves en la mina. En este ingreso de barro, 89 personas murieron. Fleischer (1976) plantean la hipótesis de que una capa de arcilla debajo de la presa puede haber actuado como base flexible y haber provocado un cierto grado de deformación del terreno. La amenaza de una oleada de barro debido a residuos no sólo proviene de los barros, sino que también se puede atribuir a la falta de relleno subterráneo.
<b>Dutoitspan Mine</b>	Sudáfrica	Mina explotada mediante Sulevel caving, un impulso importante de barro se produjo en el nivel 870 m de producción, en noviembre de 2011, durante el cual se estima que más de 4.400 m <sup>3</sup> de barro ingresaron en las labores mineras. El barro debe haber venido de relativamente alto de la columna. Algunas de las causas encontradas fueron que las galerías de drenaje superficial no estaban bien cuidadas y / o bloqueadas, había un pobre control en las aguas superficiales de la mina en el área de la planta y filtración de aguas subterráneas en los pozos.
<b>Hubei</b>	China	En una mina SLC de mineral de hierro en China, en la provincia de Hubei, experimentó un bombeo devastador en 2004, lo que resultó en al menos una víctima mortal. Una característica interesante es que la masa de roca de la minera de hierro es muy competente y no genera finos excesivos, prácticamente no posee arcillas. En 1998, esta región experimentó eventos extremos de lluvia e inundaciones. Lo más probable, finos (y posiblemente arcillas) generados desde el cráter se desplazaron en la columna de extracción en ese momento y provocaron el evento de ingreso de barro.
<b>IOZ y DOZ</b>	Indonesia	PT Freeport Indonesia opera un complejo minero de cobre y oro en el distrito minero de Ertsberg de las montañas Sudirman en la provincia de Papúa, Indonesia a una elevaciones de 3000 a 4500 metros sobre el nivel del mar. El yacimiento Deep Zone (DOZ) es la tercera mina panel caving en el Sistema Ertsberg Medio skarn (SETS) después de Gunung Timur Bijih (GBT) y la zona de mineral Intermedio (IOZ). Características geológicas e hidrológicas complejas, escarpada topografía montañosa en el hundimiento, la precipitación promedio anual de 5500 mm. Estas altas precipitaciones, sumado al material fino generado por el método de Block Caving ha generado una gran cantidad de ingreso de agua-barro.

<b>El Teniente</b>	Chile	El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta. Está ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua. Mezcla de agua proveniente de deshielos y los finos generados por el hundimiento, asociado a sobre tiraje, son las principales causas de bombeos. Se han registrado una serie de eventos de este tipo, incluso provocando la muerte de personas.
--------------------	-------	--

### 2.4.1 IOZ y DOZ Indonesia

PT Freeport Indonesia opera un complejo minero de cobre y oro en el distrito minero de Ertsberg, ubicado en la isla de Papua Nueva Guinea, Indonesia. Sus operaciones incluían a Gunung Bijih Timur (GBT) y la mina *Intermediate Ore Zone* (IOZ) (Figura 11(b)), agotadas hasta la fecha. No obstante, hoy en día opera la mina DOZ( Deep Ore Zone) mediante el método de panel caving, la que se encuentra bajo una compleja topografía a unos 1200 metros de profundidad con alturas de columnas en promedio de 500 metros.

La presencia de lluvias, aguas superficiales y las cercanías de las minas IOZ y GBT (que pueden actuar como sumideros de agua), sumado a la generación de finos “como resultado de aumento en la altura de columna, la existencia de materiales específicos (como Brecha-Mármol)” (Samosir et al, 2008). Permiten que sean las características propicias para el ingreso de agua barro.

Según estudios realizados en IOZ, la ocurrencia de flujos de barro puede suceder cuando existe más de un 20% de material de tamaño arena (< 2 mm) con un contenido de agua superior a un 8.5 % o más de un 80 % de saturación (Call & Nicholas et al,1998).

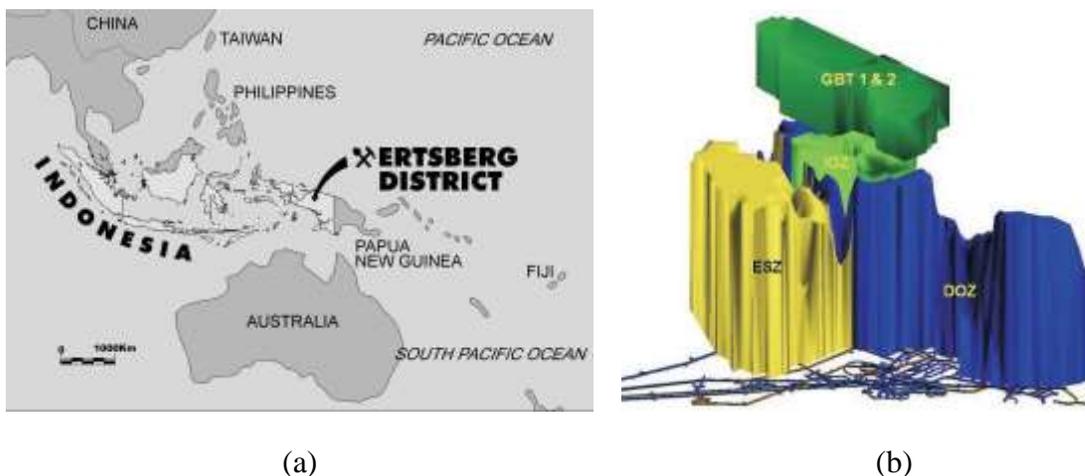


Figura 11: (a) ubicación distrito minero PT Freeport Indonesia. (b) distribución minas PT Freeport Indonesia. (Samosir et al, 2008).

Una de las principales características que posee PT Freeport Indonesia, es la definición de estados de los puntos de extracción para definir el equipo utilizado en un determinado sector. Esta decisión se presenta en la Figura 12, donde depende del porcentaje de humedad del punto de extracción y el porcentaje de finos, comparado con el tamaño de 5 centímetros. Estos estados deben ser complementados con la extracción de los puntos.

Wetness/Water content	Material size $\geq 5$ cm (M)		
	M > 70% (dominated by coarse grain)	30% < M $\leq$ 70%	M $\leq$ 30% (dominated by fine grain)
< 8.5% (dry)	A1	B1	C1
8.5 - 11%	A2	B2	C2
$\geq$ 11% (wet)	A3	B3	C3

Note:  
 Green box: any loader  
 Yellow box: any loader with close supervision  
 Red box: remote loader  
 For Class B2 and A3, HOD/Fragmentation information is critical to consider surely

Figura 12: Clasificación de barro para PT Freeport, (Samosir et al, 2008).

## 2.4.2 División el Teniente, Codelco.

La División El Teniente de Codelco ha presentado una serie de eventos de escurrimientos o bombeos de agua barro, generando pérdidas en la operación, equipos, infraestructuras y personas. Toda esta experiencia ha generado en la división la conciencia de controlar y tomar las medidas preventivas antes de que sucedan los eventos de agua barro.

Debido a lo anterior, DET ha definido una serie de estados cualitativos de humedad para los puntos de extracción que pueden ser corroborados en terreno como se muestra en la Tabla 4, según la (CODELCO, 2010). Estos estados cualitativos permiten reconocer en primera instancia el riesgo de agua barro, sin embargo las humedades cualitativas deben ser corroboradas con muestras de laboratorios para tener el dato objetivo.

Tabla 4: Calificación cualitativa de los puntos de extracción.

Condición	Estado	Humedad	Características en terreno
Seco	H0	<4%	El guante debe comprimir un puñado de material, y, al liberarlo, las partículas se separan unas de otras y el guante permanece seco.
Baja humedad	H1	<4%	El guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas se separan unas de otras, dejando el guante con trazas de humedad.
Humedad	H2	Entre 4 y 7%	El guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas tienden a cohesionarse y formar una masa frágil que, frente a una presión, se rompe.
Barro incipiente	H3	Entre 7 a 10%	El guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas tienden a cohesionarse y formar una masa resistente que, aunque sea lanzada contra una superficie plana, no pierde su forma comprimida.
Barro	H4	Mayor a 10%	El guante debe comprimir un puñado de material, y comprobar que el barro se escurra y es incapaz de formar una masa comprimida.
Agua	A		El material permite que escurra el agua.

En base a los estados en terreno y la fragmentación de los puntos de extracción, DET ha definido una matriz de criticidad (Figura 13) para los puntos de extracción en base a su porcentaje de humedad y la granulometría fina (menor a 25 cm), (CODELCO, 2010).

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cm)			
		G(x) < 25%	25% ≤ G(x) < 50%	50% ≤ G(x) < 75%	G(x) ≥ 75%
Humedad cualitativa	H0: Seco	Normal	Normal	Normal	Normal
	H1: Levemente húmedo	Normal	Normal	Observación	Observación
	H2: Húmedo	Normal	Observación	Observación	Alerta
	H3: Barro incipiente	Observación	Alerta	Alerta	Alerta
	H4: Barro	Alerta	Alerta	Alerta	Alerta
A: Agua		Normal	Observación	Alerta	Alerta

Figura 13: Matriz de criticidad DET.

Los puntos que se encuentren en estado de alerta o con riesgo de barro son declarados agua/barro y no poseen extracción, debido a su alta probabilidad de bombeo de agua barro. Además, los puntos vecinos a los declarados agua/barro cambian su estado a barrera, donde no se extrae mineral para evitar la contaminación lateral. Por otro lado, si existen puntos en observación o que su altura de extracción supere el 130% de la columna de primario son declarados limitados, debido a que sobre esa altura es muy probable que ingrese barro, ya que se encuentran cercanos a las fuentes o sumideros de agua, la Tabla 5 resume los estados asociados al agua barro.

Tabla 5: Estados de puntos de extracción DET referidas al agua barro (Navia Moreno, 2014).

Estado	Definición
Limitado	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un periodo determinado de tiempo (velocidad controlada).
Reabierto Extracción Tele Comandada	Punto en que se aplica extracción mediante equipos LHD tele comandados.
Barrera	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral ó barro de puntos adyacentes; no se extrae.
Barro/Agua	Punto que debido a la penetración del agua presentan riesgo de bombeo y/o escurrimiento; no se extrae.

## 2.5 Teorías de Flujo gravitacional

El flujo gravitacional de partículas se define como: “el flujo de material fragmentado no cohesivo a través de un punto de extracción afectado por la fuerza de gravedad. Se caracteriza por el movimiento de partículas dentro de un elongado elipsoide de revolución, donde además del desplazamiento vertical de partículas hay una rotación (movimiento secundario)”, (Arce, 2002).

Brown y Hawksley (1946), Janelid y Kvapil (1966), Laubscher (1981 y 1994), Richardson (1981) y otros autores han estudiado y propuesto teorías acerca del flujo gravitacional de partículas, sin embargo en esta sección solo se enfocará en las teorías de flujo gravitacional relevantes para el estudio.

### 2.5.1 Teoría de flujo gravitacional aplicadas al diseño

Janelid y Kvapil (1965) fueron los primeros en encontrar un modelo matemático del fenómeno de flujo gravitacional, basados en modelos físicos de arena. En su teoría los autores muestran la

existencia de dos volúmenes que caracterizan el flujo granular, el elipsoide de extracción y el de relajación. El primero, define el límite del material quebrado que se ubica sobre el punto de extracción y, el segundo, es la envolvente de material que está en movimiento con el que no lo posee. La Figura 14, muestra el esquema de los elipsoides definidos por Kvapil y Janelid.

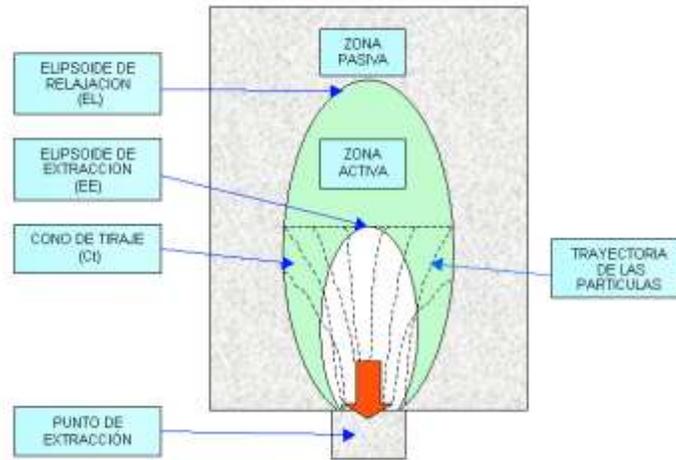


Figura 14: Modelo de Janelid y Kvapil (Arce, 2002).

La teoría de Janelid y Kvapil analiza un elipsoide aislado de extracción, para minas de Sublevel Caving. De este estudio, se deducen 3 características para el flujo gravitacional, que se detallan a continuación.

- La razón de los de los elipsoides permanece constante durante toda la extracción.
- La movilidad del elipsoide determinan el diámetro de este mismo, deduciendo que partículas más finas presentan un elipsoide de menor diámetro, en cambio material más grueso genera elipsoides más amplios.
- A medida que aumenta la extracción la excentricidad del elipsoide disminuye, es decir el diámetro del elipsoide se mantiene constante a medida que aumenta la altura.

La teoría de Janelid y Kvapil, para tiraje aislado, se complementa con los resultados obtenidos por Laubscher (1981) de flujo gravitacional para minas de asbestos. Además, ambos autores proponen una teoría de tiraje interactivo definida como la interacción entre elipsoides continuos. Esta interacción depende mucho de la distancia que separe los puntos de extracción que ambos autores definen de manera distinta.

Laubscher propone que la distancia crítica de separación de puntos de extracción es 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado, en cambio, Janelid y Kvapil define que la distancia es igual al diámetro de tiraje aislado (Figura 15)

Si la distancia que separa dos puntos de extracción es mayor que la distancia crítica del diámetro del elipsoide, existe un tiraje aislado produciendo sectores sin movimiento de mineral afectando la estabilidad de los pilares del nivel de producción por una mayor sobrecarga sobre estos y permitiendo el ingreso temprano de dilución (Figura 15 (A)). En cambio, si la distancia es menor que la distancia crítica del diámetro del elipsoide, estos se superponen permitiendo que la

columna de mineral baje de forma conjunta, disminuyendo la dilución temprana. No obstante, reduce el tamaño de los pilares afectando de igual forma la estabilidad (Figura 15 (B)).

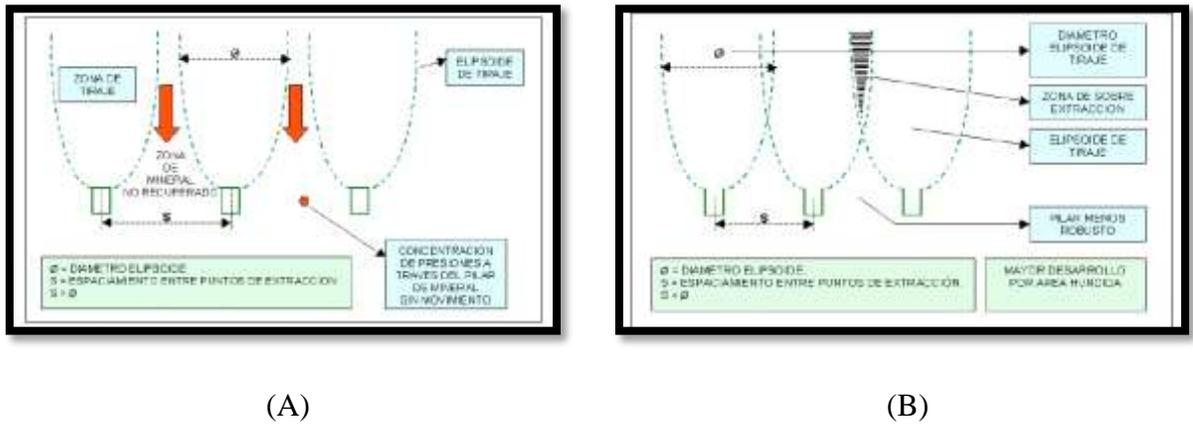


Figura 15 Superposición de elipsoides de extracción (Arce, 2002)

Otro punto que presentan ambas teorías es la presencia de altura que de interacción de los elipsoides, donde Laubscher considera las calidades de rocas presentes in situ y el espaciamiento que tendrán los puntos de extracción (Figura 16), en cambio, Kvpil considera la fragmentación y el diámetro del elipsoide aislado para calcular dicha altura (Figura 17).

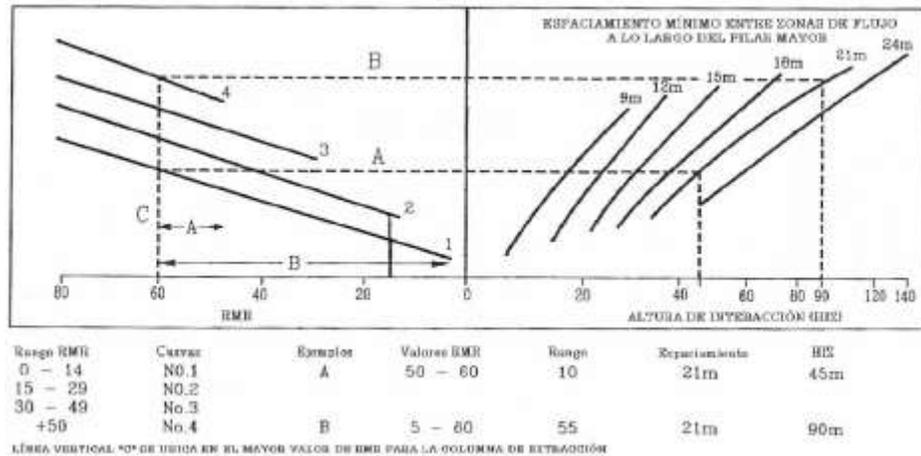


Figura 16: Determinación altura de interacción (HIZ) según Laubscher. (Arce, 2002).

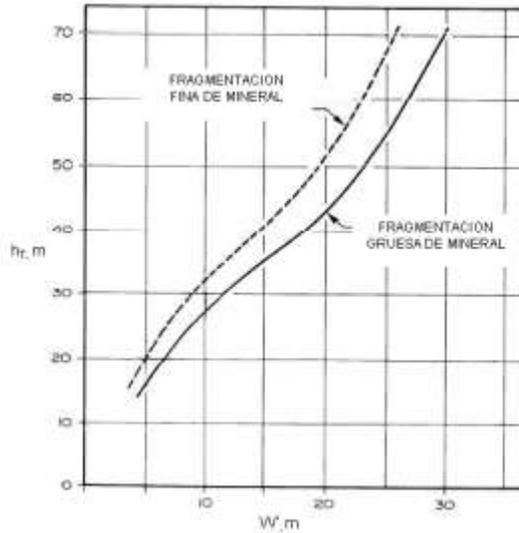


Figura 17: Determinación altura de interacción (HIZ) Kvapil (1992).

Los modelos anteriormente mencionados presentan una fragmentación constante a lo largo de la columna de extracción, sin embargo la experiencia dicta que a medida que aumenta la altura de extracción la fragmentación comienza a ser más fina, debido a que existe fragmentación secundaria por la mayor distancia recorrida del material fragmentado (Montecino, 2011).

Por otro lado, Vargas (2010), en base a simulaciones de flujo gravitacional y variaciones de tamaños de partículas en altura, determino que los elipsoides disminuyen su diámetro a medida que aumenta la extracción, por ende existen condiciones distintas de tiraje interactivo a medida que aumenta la extracción (Figura 18). Considerando esto, es necesario tener en cuenta esta variable y cómo puede afectar en el tiraje interactivo de los puntos de extracción a medida que aumenta la fracción de extracción.

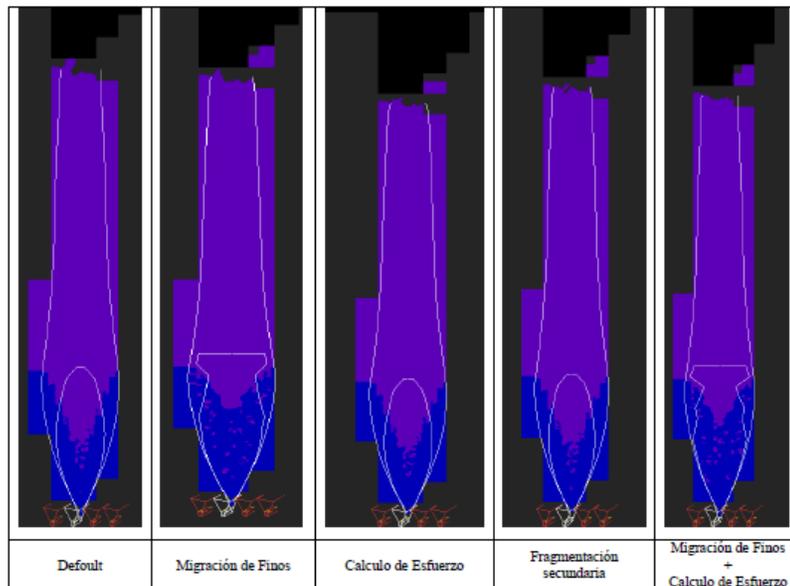


Figura 18: Efecto de la fragmentación diferenciada en altura en la geometría del IEZ (Vargas, 2010).

Por otra parte, Castro y Whiten (2007), con evidencia experimental revelaron que las zonas de movimiento aislado crecen indefinidamente a medida que se extrae desde el punto. Por otro lado la altura de columna y la masa extraída son las principales influencias sobre la zona de extracción en flujo aislado.

## **2.5.2 Modelos de matemáticos de flujo gravitacional**

La gran mayoría de las teorías de flujo gravitacional revisadas en la sección anterior se han basado en modelos físicos de arena o grava para determinar el comportamiento de los elipsoides. No obstante, “el flujo de material quebrado no puede ser descrito satisfactoriamente por teorías desarrolladas para describir el flujo de otros materiales particulados como arena, granos, etc” (Yengue, 1980). Es por este motivo, que existen dos modelos matemáticos para abordar el flujo gravitacional, que buscan reflejar las características de la realidad, estos son el enfoque estocástico o de autómatas celulares (Castro, 2006) y en el balance y conservación de masa (Pierce, 2004).

### **2.5.2.1 Autómatas Celulares**

Un autómata celular corresponde a un modelo matemático que simula un sistema de elementos, el cual evoluciona a pasos discretos. Básicamente un autómata celular consiste en un arreglo regular de celdas del mismo tipo, que tienen un conjunto finito y discreto de estados posibles. Estos estados se actualizan de manera discreta en el tiempo, de acuerdo a las reglas que dependen exclusivamente del estado de la vecindad de las celdas (Castro, 2006).

La ventaja que poseen las autómatas celulares es que basan en reglas simples del movimiento de partículas que evolucionan a pasos discretos, lo que reduce el tiempo de procesamiento, ya que no se resuelve ecuaciones diferenciales. No obstante, deja de lado características naturales del movimiento de partículas (González, 2014).

### **2.5.2.2 Balance y conservación de masa**

En la resolución matemática del problema de flujo gravitacional mediante la conservación y balance de masa, surge un programa computacional desarrollado en el marco del International Caving Study el año 2002, REBOP (Rapid Emulator Based on PFC3D), basado en los mecanismos observados en PFC3D y modelos físicos para lograr simular la evolución de los elipsoides de extracción y su interacción (Vargas, 2010).

REBOP está basado en la resolución de ecuaciones de balance que determinan una zona de extracción aislada, la cual evoluciona fundamentándose en que el material fluye de una zona de baja porosidad hacia una zona de alta porosidad en el interior del elipsoide (Itasca, 2007). Además, el objetivo de simular el flujo gravitacional se basa en los siguientes principios (Pierce, 2009):

- El medio se discretiza en tajadas y la masa que compondrá el flujo gravitacional pasaran de una tajada superior a otra inferior.
- Ecuaciones de balance de masa gobernarán el movimiento del material que fluye de la tajada superior a la tajada al siguiente.

- El material se moverá desde una zona de baja porosidad, ubicada en la región que no sufre movimiento, a una zona de alta porosidad producto de la extracción.
- El mecanismo que controlará el crecimiento vertical será el colapso. Es así como la tajada superior colapsará debido al aumento de porosidad de las regiones superiores. La expansión lateral del elipsoide de extracción estará controlado por el mecanismo denominado erosión, esto es, el aumento progresivo a medida que el material fluye. De esta forma el material que se encuentran en las proximidades se integrara al flujo produciendo que el elipsoide aumente su radio.
- El área de expansión dependerá de la diferencia en área entre los dos niveles. En caso de ser las dos áreas idénticas el material simplemente se trasladará por completo al nivel inferior. Cuando el área superior es menor que la de la parte inferior, el material pasara el nivel inferior aumentando su porosidad y expandiendo su volumen.
- Cuando el elipsoide de movimiento alcance la superficie, la porosidad permanecerá constante y el balance de masa satisface: (a) una reducción en la topografía y (b) una expansión lateral de la zona de extracción producto del aumento de la porosidad.
- Para el cálculo interno de las leyes, la herramienta discretizará el medio mediante marcadores, que tendrá un volumen determinado y características correspondientes a su origen. Este marcador se moverá de acuerdo al perfil de velocidades impuesta por el flujo y cuando sean extraídos se le asociara la masa correspondiente al volumen inicial.

## 2.6 Modelos de Mezcla

### 2.6.1 Modelo de mezcla de Laubscher

Laubscher (1994) propone un modelo de mezcla para el ingreso de la dilución, basado en encontrar el porcentaje de la columna de extracción donde ingresa el material no deseado (PED). El punto de entrada de dilución depende de la altura de columna ( $H_c$ ), altura de interacción de los elipsoides (HIZ), el factor de esponjamiento ( $s$ ) y un factor de acuerdo al tiraje de la operación ( $dcf$ ), la Ecuación 2 presenta el cálculo del punto de entrada de dilución.

$$PED[\%] = \frac{(H_c \times s - HIZ) \times dcf}{H_c \times s} \times 100[\%]$$

**Ecuación 2: Punto entrada de dilución**

La altura de interacción de los elipsoides se extrae mediante el ábaco de la Laubscher de la Figura 16, donde se debe considerar el tipo de malla a utilizar y el tipo de roca presente en el entorno.

Por otra parte, el factor de esponjamiento considera la variación de volumen de la columna de extracción debido a la propagación del hundimiento, se propone 1,16 para fragmentación fina, 1,12 para media y 1,08 para gruesa.

El factor de tiraje está relacionado en controlar o mitigar el ingreso de la dilución con las buenas o malas prácticas de extracción, mediante la desviación estándar de un punto de extracción y sus vecinos (Figura 19).



Figura 19: Factor de control de tiraje (Laubscher, 1994)

Con el punto de entrada de dilución se realiza la mezcla volumétrica de los bloques, donde se traza una línea desde el PED y que pase por la mitad de la altura extraíble, este punto se utiliza como pivote para mezclar todos los bloques, la Figura 20 muestra un ejemplo para un PED de 60%. Para la nueva condición generada por el modelo de mezcla se tendrá que cada bloque tendrá un aporte de los bloques superiores variando sus leyes, densidad, etc.

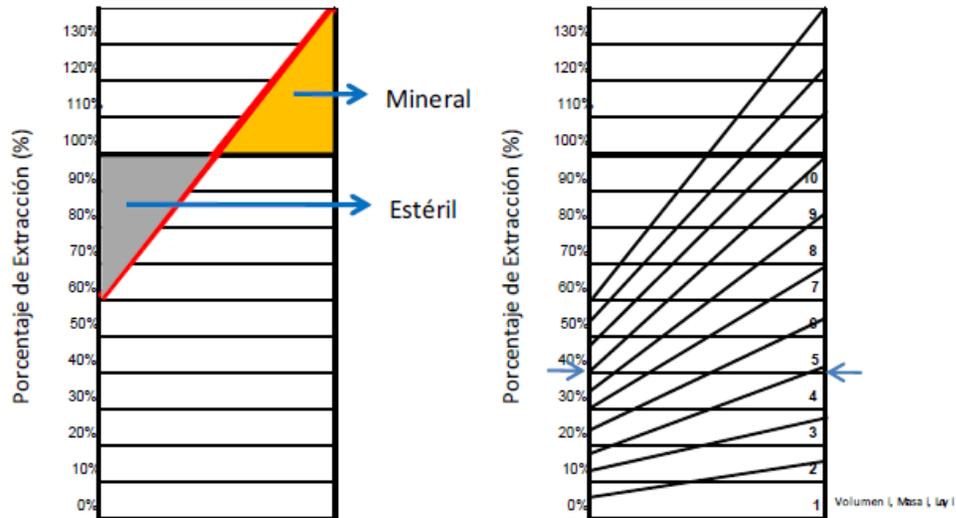


Figura 20: Modelo volumétrico de mezcla con PED=60% (Laubscher, 1994)

Este modelo de mezcla es utilizado por GEMCOM en su herramienta PCBC para evaluar planes y alturas de extracción económicamente rentables.

## 2.7 Modelo de mezcla mediante simulación

La metodología de Laubscher es altamente utilizada en la industria minera, sin embargo posee una simplificación considerable, ya que la dilución solo se considera como aspectos geométricos

y la calidad de la roca y migración de finos no es considerada de forma directa. Además, considera que las características de la roca son uniformes para toda la columna de mineral.

Sin embargo, existe la posibilidad de simular el flujo gravitacional mediante software (ya sea de balance de masa o de autómatas celulares) que permiten ver las condiciones de la roca bloque a bloque y notar sectores preferenciales de entrada de dilución. Debido a que rocas de menor calidad o fragmentación más fina, tendrán preferencia al ingresar al elipsoide de extracción.

En base a lo anterior Montecino (2010) utilizó REBOP como una herramienta para generar un modelo de fragmentación y mezcla para la DET, donde las diferencias de alturas de interacción, PED y finos entre la simulación y la realidad para Reservas norte, Diablo Regimiento, 4-sur y Esmeralda son menores al 15 %.

## **2.8 Metodología modelo de regresión logística (extracto Memoria Pérez (2017))**

Generalmente, cuando se quiere dejar una variable en función de otra, se utiliza una regresión lineal (simple o múltiple). Esta función estima los coeficientes normalmente con el método de mínimos cuadrados y funciona correctamente desde el punto de vista aritmético. Lo que distingue a un modelo de regresión logística del modelo de regresión lineal es que la variable de resultado en la regresión logística binaria o es dicotómica

Hay dos razones principales para la elección de la distribución logística. En primer lugar, desde un punto de vista matemático, es una función extremadamente flexible y utilizada fácilmente. En segundo lugar, los parámetros del modelo son la base para las estimaciones de efecto clínicamente significativas

Cuando la variable dependiente es dicotómica, es decir, tiene un valor de ocurrencia o de un cierto fenómeno, al evaluar la función para valores específicos de las variables independientes se obtendrá un número que será diferente de 1 y de 0 (los valores posibles de la variable dependiente), lo que carece de sentido. En este caso, la regresión lineal debe ser descartada por la regresión logística multivariable. La regresión logística multivariable tiene tres objetivos, que son:

- Obtener una estimación no sesgada o ajustada de la relación entre la variable dependiente (o resultado) y una variable independiente.
- Evaluar varios factores simultáneamente que estén, presumiblemente, relacionados de alguna manera (o no) con la variable dependiente, y conocer su efecto de forma ajustada.
- Construir un modelo y obtener una ecuación con fines de predicción o cálculo del riesgo, de manera que éste pueda estimarse para una nueva situación, con una cierta validez y precisión.

Los modelos de regresión son herramientas estadísticas utilizadas para describir la relación entre un variable objetivo y un conjunto de variables. La regresión logística se utiliza cuando la variable que se desea modelar es dicotómica, es decir, del tipo Sí/No, Bueno/Malo, Presente/Ausente, etc. y busca modelar la influencia de la aparición de las variables explicativas en la ocurrencia del fenómeno dicotómico (Hosmer & Lemeshow, 2013), en este caso la variable dicotómica es si hay barro o no. En la práctica, para aplicar este modelo se crea una variable binaria ficticia cuya estructura es:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{cuando el fenómeno ocurre} \\ 0 & \text{cuando el fenómeno no ocurre} \end{cases}$$

**Ecuación 3: Variable binaria para el modelo de regresión logística.**

Donde  $i$  representa cada observación que se posee.

Para construir un modelo mediante regresión logística se debe seguir una secuencia de pasos establecida, los que tienen como objetivo determinar el mejor ajuste de variables independientes o covariables que estimen la variable dependiente, en este caso la entrada de barro o fenómeno de estudio (Hosmer & Lemeshow, 2013).

El modelo de regresión logística tiene la forma,

$$p(x) = \frac{e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n}}{1 + e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n}} \begin{cases} b_1, b_2, \dots, b_n = \text{ponderadores} \\ x_1, x_2, \dots, x_n = \text{variables} \end{cases}$$

**Ecuación 4: Probabilidad del modelo de regresión logística multivariable.**

Donde  $b_1, b_2, \dots$ , son ponderadores de las variables independientes  $x_1, x_2, \dots$ , y cuantifican el efecto de éstas variables sobre la variable dependiente. La determinación de los parámetros  $b_i$  se debe maximizar la probabilidad de ocurrencia del fenómeno en estudio, en este caso del ingreso de agua-barro. Cabe destacar que para la creación de los modelos de regresión logística se emplea el software SPSS 23 (Gualtieri y Curran, 2015), que permite estimar los ponderados del modelo maximizando la probabilidad de representar el fenómeno (maximiza la verosimilitud). A continuación, se describen los pasos para la construcción de los modelos multivariados de regresión logística.

Por lo tanto, la regresión logística es un modelo estadístico de clasificación binaria que entrega la probabilidad de pertenencia a uno de los grupos previamente definidos en la construcción.

### **Paso 1: Análisis univariable**

En este paso se realiza un análisis de regresión logística univariable entre cada variable independiente y la variable dependiente. Este análisis permite determinar y cuantificar si es que existe un efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente. En este paso se determina la significancia de cada variable independiente. Si la significancia es menor a un 20%, existe correlación y el ponderador de la variable independiente es distinto de 0, es decir, se acepta con un 80% de confiabilidad que los ponderadores son distintos de 0 y que la variable independiente afecta en el fenómeno. Las variables que presentan una significancia superior al 20% deben ser analizadas en el modelo multivariable con mayor cuidado. El análisis univariable tiene la forma,

$$(Y = 1|x) = p(x) = \frac{e^{b_0 + \beta x}}{1 + e^{b_0 + \beta x}}$$

**Ecuación 5: Probabilidad modelo de regresión logística univariable.**

Donde,  $(Y=1|x)$  corresponde a la aparición de barro sujeta a la variable  $x$ ,  $(x)$  representa la probabilidad de que ocurra el fenómeno (agua-barro en un punto de extracción),  $\beta_0$  es la constante del modelo,  $\beta$  es el ponderador de la variable  $x$ . Cabe destacar que el análisis de

regresión logística univariable es matemáticamente equivalente a la prueba de independencia entre variables mediante el test Chi-Cuadrado. En este test, las hipótesis estudiadas corresponden a las siguientes:

$H_0$ : Las variables  $X$  e  $Y$  son independientes

$H_1$ : Las variables  $X$  e  $Y$  son dependientes

En este test se busca rechazar  $H_0$  con un 95% de confianza (significancia de 5%), lo que es equivalente a concluir que las variables  $X$  e  $Y$  son dependientes.

## Paso 2: Análisis multivariable

El segundo paso en la construcción de modelos de regresión logística consiste en realizar un análisis multivariable, donde se determina y cuantifica el efecto en conjunto de todas las variables independientes sobre la variable dependiente. En este caso el modelo multivariable tiene la forma

$$p(x) = \frac{e^{b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_n * x_n}}{1 + e^{b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_n * x_n}}$$

Ecuación 6: Probabilidad del modelo de regresión logística multivariable.

En este paso se determina la significancia de cada variable dentro del modelo multivariable. Si la significancia es menor o igual a 5%, la variable tiene efecto en la entrada de agua-barro. Si supera el 5%, esta variable es eliminada preliminarmente. A continuación, se realizan dos tipos de modelos multivariables: un modelo con todas las variables significantes (Ilustración 50 (a)), y otros modelos agregando de forma unitaria las variables eliminadas preliminarmente Ilustración 50(b)).

Luego, se comparan los ponderadores del modelo sin las variables eliminadas con los ponderadores del modelo con las variables eliminadas (Ilustración 50 (c)). Si alguno de los ponderadores de las variables significantes no sufre un cambio superior al 20%, la variable eliminada debe ser reincorporada en el modelo. Si supera el 20%, entonces existe un efecto de colinealidad entre variables y estas variables deben ser eliminadas definitivamente ( Figura 21 (d)). Finalmente, el modelo considera las variables que no fueron eliminadas.

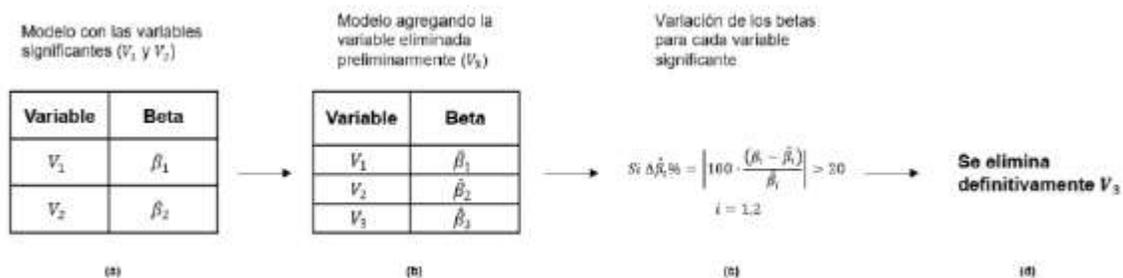


Figura 21: Ejemplo de la metodología para la construcción de modelos de regresión logística multivariable. (a) Modelo con variables significantes. (b) Modelo con variables significantes más una variable eliminada preliminarmente. (c) Evaluación de los betas de las variables significantes en ambos modelos. (d) Eliminación definitiva de la variable si no cumple el criterio de variación de betas.

Para la estimación de los parámetros, es decir, la calibración del modelo se utiliza el método de máxima verosimilitud, en el cual se busca maximizar la probabilidad estimada de obtener los resultados categorizados según Hosmer & Lemeshow (2013) La función de verosimilitud es la siguiente:

$$l(\beta) = \prod_i f(x_i, \beta)$$

**Ecuación 7: Función de verosimilitud.**

Donde  $(x_i)$  corresponde en este caso al modelo de regresión logística. La función de verosimilitud puede ser expresada como:

$$l(\beta) = \prod_i p(x_i)^{y_i} [1 - p(x_i)]^{1-y_i}$$

**Ecuación 8: Función de verosimilitud, forma 2.**

Esta función de verosimilitud se emplea utilizando logaritmos:

$$L(\beta) = \ln(l(\beta)) = \sum_i (y_i \ln[p(x_i)] + (1 - y_i) \ln[1 - p(x_i)])$$

**Ecuación 9: Logaritmo función de verosimilitud.**

Para calcular los estimadores de máxima verosimilitud se calculan al aplicar condiciones de primer orden a la función de verosimilitud. En este caso se obtienen las siguientes ecuaciones de verosimilitud:

$$\begin{aligned} \sum [y_i - p(x_i)] &= 0 \\ \sum x_i [y_i - p(x_i)] &= 0 \end{aligned}$$

**Ecuación 10: Condiciones de borde función de verosimilitud.**

Al resolver este problema de optimización se obtiene como resultados un conjunto de estimadores asintóticamente eficientes, insesgados y distribuidos normalmente.  $\beta_0$  corresponde al punto de corte en el eje de las ordenadas y los demás estimadores  $\beta$  corresponden a los coeficientes asociados a las variables explicativas. (Hosmer & Lemeshow, 2013).

En base al modelo de regresión logística se obtienen probabilidades de ocurrencia del fenómeno analizado, es por esto que es necesario determinar un valor de corte para esta probabilidad de forma tal, de que para valores a este valor sea de uno (o barro en el caso de este estudio) y en caso contrario se asigna el valor de 0 (no barro).

## **2.9 Flowsim®**

FlowSim® es un simulador de flujo gravitacional, para minería de Block/Panel Caving, basado en autómatas celulares, es decir, que tienen componentes estocásticos. Los modelos estocásticos

simulan el flujo usando elementos discretos que migran hacia abajo por efecto de la gravedad a medida que se extrae el material. Básicamente un autómata celular consiste en un arreglo regular de celdas del mismo tipo, que tienen un conjunto finito y discreto de estados posibles. Estos estados se actualizan de manera discreta en el tiempo, de acuerdo a las reglas que dependen exclusivamente del estado de la vecindad de las celdas (Castro, 2006).

Las características que definen un autómata celular son:

- **Espacio:** Se representa como una rejilla o cubo cuadrículado finitamente extendido, que depende de la dimensión del modelo. Cada cubículo de la rejilla es una célula que representa un espacio.
- **Estado:** Cada célula puede tomar un valor a partir de un conjunto finito de estados.
- **Vecindad:** Conjunto de células con las cuales una determinada célula interactúa.
- **Función de transición:** Se aplica a todas las células de la cuadrícula una función de transición que toma como argumentos los valores de la célula en cuestión y los valores de sus vecinos, y regresa el nuevo valor que la célula tendrá en la siguiente etapa de tiempo. Esta función se aplica, como ya se dijo, de forma homogénea a todas las células, por cada paso discreto de tiempo. Este concepto también es llamado regla de evolución del autómata.

### 2.9.1 Funcionamiento FlowSim®

El simulador considera al macizo rocoso como una discretización regular de bloques. La discretización está relacionada con las dimensiones de los puntos de extracción, donde la dimensión de los bloques debe ser igual o menor al ancho del punto. Cada bloque discretizado se le llama celda o célula y representa un “espacio” único. Cada célula puede poseer tres posibles “estados” (Figura 22).

- **Granular:** Celdas que representan el material fragmentado (mineral, dilución, etc) y poseen la capacidad de movilidad (cambiar de posición) a lo largo de la simulación.
- **Vacío:** Cada vez que se extrae un bloque granular en el punto de extracción, se reemplaza por un vacío. El principal algoritmo de movimiento en FlowSim® es generado por el ascenso de vacíos.
- **Sólido:** Celdas que representan las paredes, pilares, etc, es decir son aquellos bloques que no poseen la capacidad de movilidad (cambiar de posición). Permanecen durante toda la simulación en su posición original.

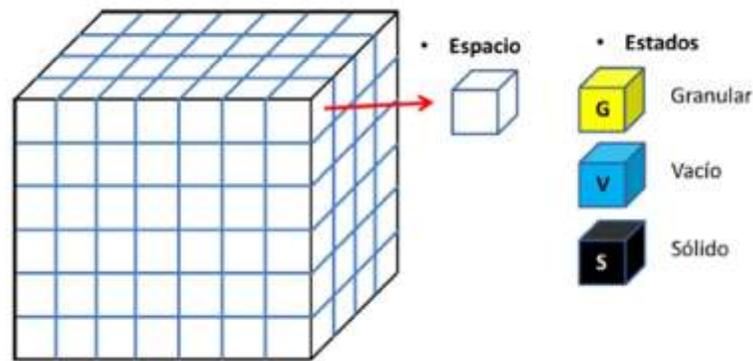


Figura 22: Representación del espacio y estado (Gonzalez, 2014)

El vacío en estudio debe cumplir la condición de la Ecuación 11, donde  $N_{vacios}$  es la cantidad de vacíos presentes en la vecindad del bloque observado y  $C_v$  es la restricción de bloques mínimos de vacíos para que se rellene el bloque superior. La Figura 23 presenta un esquema de cómo se rellenan los bloques.

$$N_{vacios} \geq C_v$$

Ecuación 11: Condición para espacios vacíos.

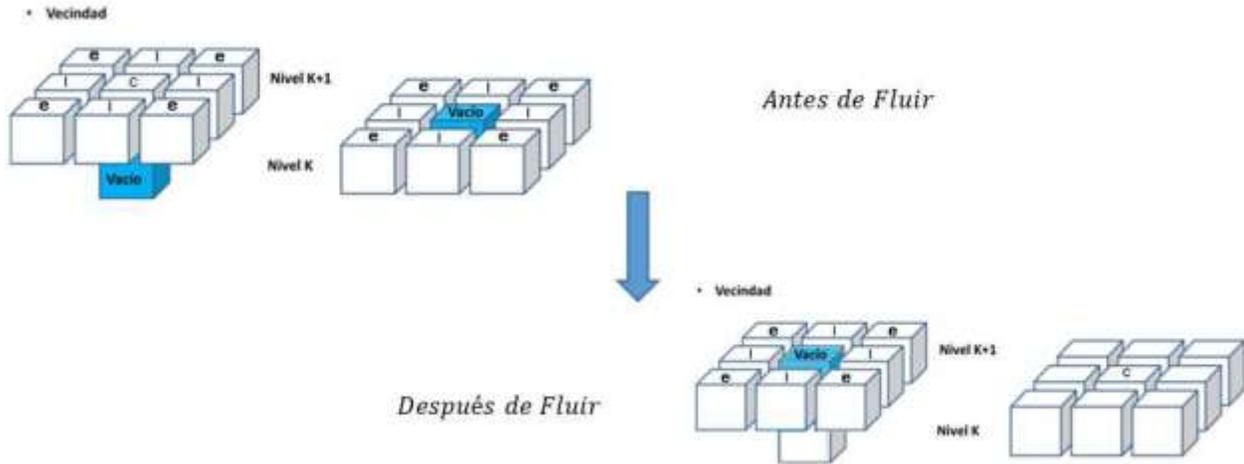


Figura 23: Diagrama selección bloque superior que se transformará en vacío (Fuentes, 2015).

Para que asciendan los bloques de vacíos, FlowSim® realiza una simulación de Montecarlo para los nueve bloques sobre el bloque vacío, donde la probabilidad de los está regida por la Ecuación 12. Esta función de probabilidad utiliza el inverso de la distancia de los bloques y la calidad geotécnica, estos parámetros son calibrados mediante los coeficientes N y M, que calibran la distancia y la calidad de roca, respectivamente.

$$p_i = \frac{d_i^{-N} * RMR_i^{-M}}{\sum_{k=1}^9 d_k^{-N} * RMR_k^{-M}}$$

Ecuación 12: Función de probabilidad de FlowSim®.

$p_i$  : Probabilidad de descender del bloque “i”.

$d_i$  : Distancia del bloque granular al vacío en análisis.

$RMR_i$  : Calidad geotécnica del bloque i.

N y M : Coeficientes del inverso a la distancia y calidad geotécnica, respectivamente.

Rojas (2017), realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros Cv y N, en comparación con el diámetro del elipsoide de extracción. Donde para el caso de los vacíos un aumento en la restricción disminuye el diámetro del elipsoide de extracción, en cambio, para el inverso de la distancia (N) un aumento en N reduce la probabilidad de los bloques más extremos, por ende un elipsoide de menor diámetro.

Valencia (2014) propuso el algoritmo de flujo preferencial en FlowSim®, asociado al tipo de roca. De rocas de menor calidad geotécnica, presentan una mayor probabilidad de moverse a través del elipsoide de extracción.

### 3 ANÁLISIS DE FACTORES QUE AFECTAN LA CONTAMINACIÓN POR BARRO.

Como se mencionó en la sección 2.3, la contaminación por barro es un fenómeno multivariable que no puede ser atribuible a un factor en específico. Sin embargo, existe evidencia sobre un mayor efecto de ciertos factores dependiendo del sector o punto que se esté estudiando (Navia, 2014; Pérez, 2017; BCTEC, 2018).

Debido a que algunos factores afectan de mayor forma el ingreso de agua barro es necesario estudiar que tan relevantes son estos efectos, de manera de poder aislar la variable de diseño de este estudio y determinar su influencia real en la contaminación de puntos por barro. Dado lo anterior, este capítulo realiza un análisis estadístico y exploratorio de los factores de entorno y operación de los sectores estudiados, con la finalidad de determinar condiciones semejantes entre sectores o tipos de malla.

#### 3.1 Altura de Roca primaria

Los sectores estudiados presentan alturas de roca primaria variantes entre los 100 a 500 metros, con una gran concentración de puntos por bajo los 180 metros (ver Figura 24). Es en estos puntos donde se produce la mayor parte de los puntos contaminados por barro, como se muestra en la Figura 25, corroborando lo dicho por Pérez (2017) y BCTEC(2018) que una menor altura de columna de roca primaria aumenta la probabilidad de contaminación por barro.

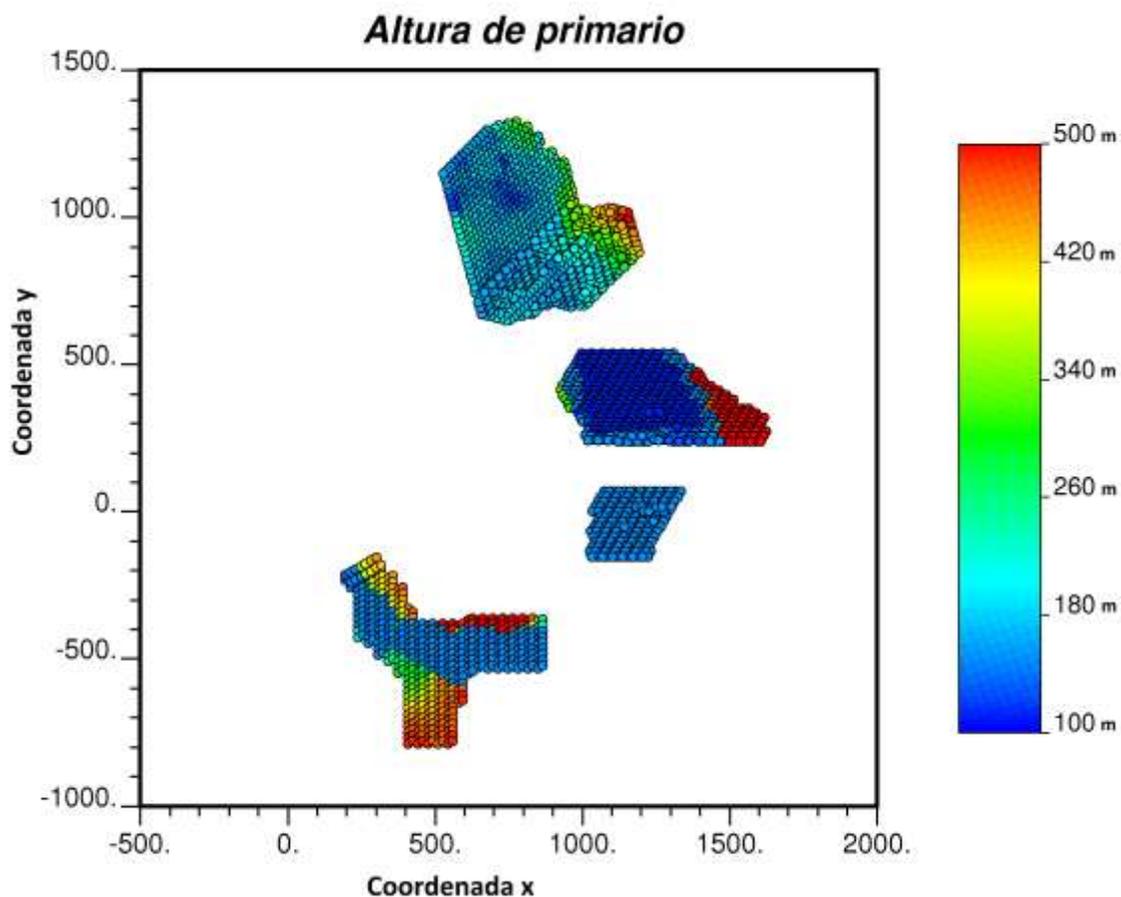


Figura 24: Distribución alturas de roca primaria de sectores en estudio.

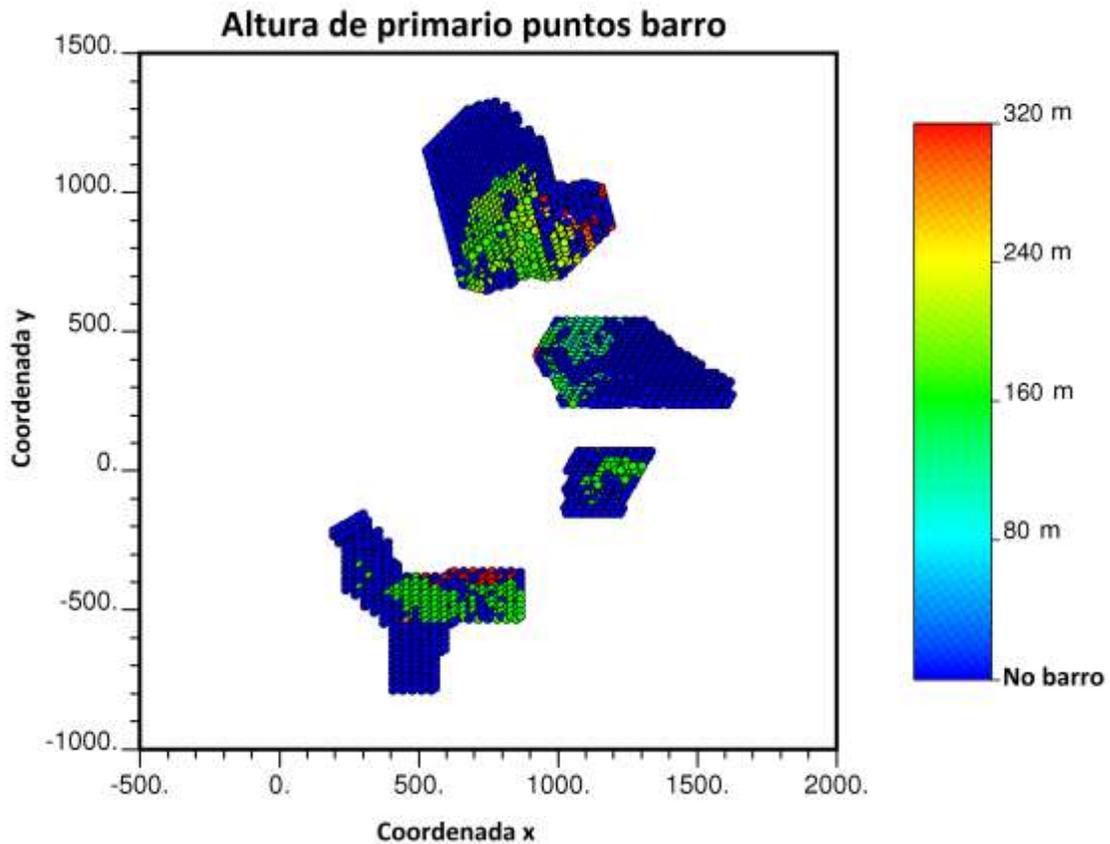


Figura 25: Distribución alturas de roca primaria de puntos contaminados.

Por otra parte, la distribución de alturas de primario de los puntos con presencia de barro presentan los mismos indicadores para los cinco sectores, ver Tabla 6, (Curtosis  $>0$ , distribución leptocúrtica y asimetría  $>0$ , valores concentrados por sobre la media). Sin embargo, sus medidas de tendencia central difieren entre sí, pero quedando dentro o muy cerca del intervalo de los 150 a 200 metros, como se puede apreciar en la Figura 26.

Cabe destacar, que para los sectores en estudio, analizar la altura de columna Insitu es similar a realizar el análisis de esta sección, debido a que la altura de roca secundaria es mínima o nula (dado la profundidad de los sectores), por ende la altura de roca Insitu y roca primaria son muy similares. Sin embargo, de manera de complementar este análisis en el Anexo A se presenta el análisis de la altura de roca Insitu.

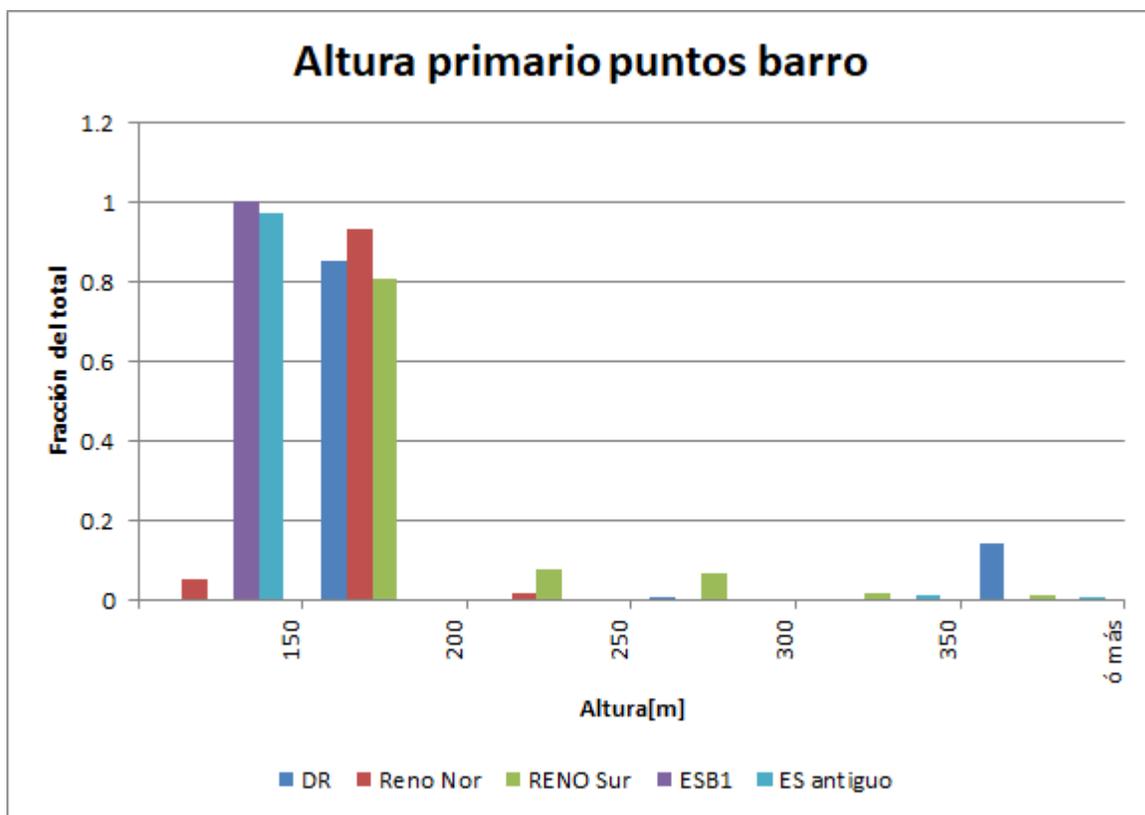


Figura 26: Altura de roca primaria puntos contaminados por barro.

Tabla 6: Estadísticas básicas de la altura de roca primaria puntos contaminados por barro.

Sector	ES antiguo	RENO Sur	RENO Norte	Bloque 1	DR
Dimensiones[m]x[m]	15x17	15x17	15x20	15x20	17x20
Mínimo	109	140	120	149	150
Mediana	109	180	180	149	150
Máximo	549	500	240	149	590
Curtosis	53.1	15.4	5.8	-	2.8
Asimetría	6.7	3.4	0.7	-	2.1
Promedio	123.0	192.0	172.1	149.0	202.8
Coefficiente de Variación	18.5	12.3	1.4	0.0	82.8

### 3.2 Altura a la topografía y canalón

La altura a la topografía de los sectores en estudio permite determinar zonas de acumulación de agua en superficie, debido a que menor altura a la topografía, indica que el punto está bajo una zona de acumulación o si los puntos presentan alturas descendentes en una dirección, se está en presencia de una ladera de cerro, que de igual forma permite un flujo preferencial de agua.

Bajo estos sectores se esperaría que los puntos tuvieran mayor probabilidad de ser contaminados por barro, ya que existe un flujo mayor de agua hacia los niveles productivos, debido a la fuente de agua en superficie.

Si se observa la Figura 27, es claro notar que los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda bloque 1, presentan una zona de acumulación asociado a una depresión en superficie. No obstante, los sectores de RENO y Esmeralda antiguo presentan una zona de acumulación de agua debido a las laderas de cerro.

Ahora bien, si se relaciona las zonas de acumulación de agua en superficie con la ubicación en el plano de los puntos contaminados por barro (ver Figura 28), casi la totalidad de los puntos contaminados por barro se encuentran bajo una zona de acumulación de agua en superficie. Esto es análogo a estudiar el canalón, ya que los puntos que estén bajo una zona de acumulación o el canalón tendrán un flujo de agua mayor hacia el nivel productivo, por ende una mayor probabilidad de ingreso de agua barro.

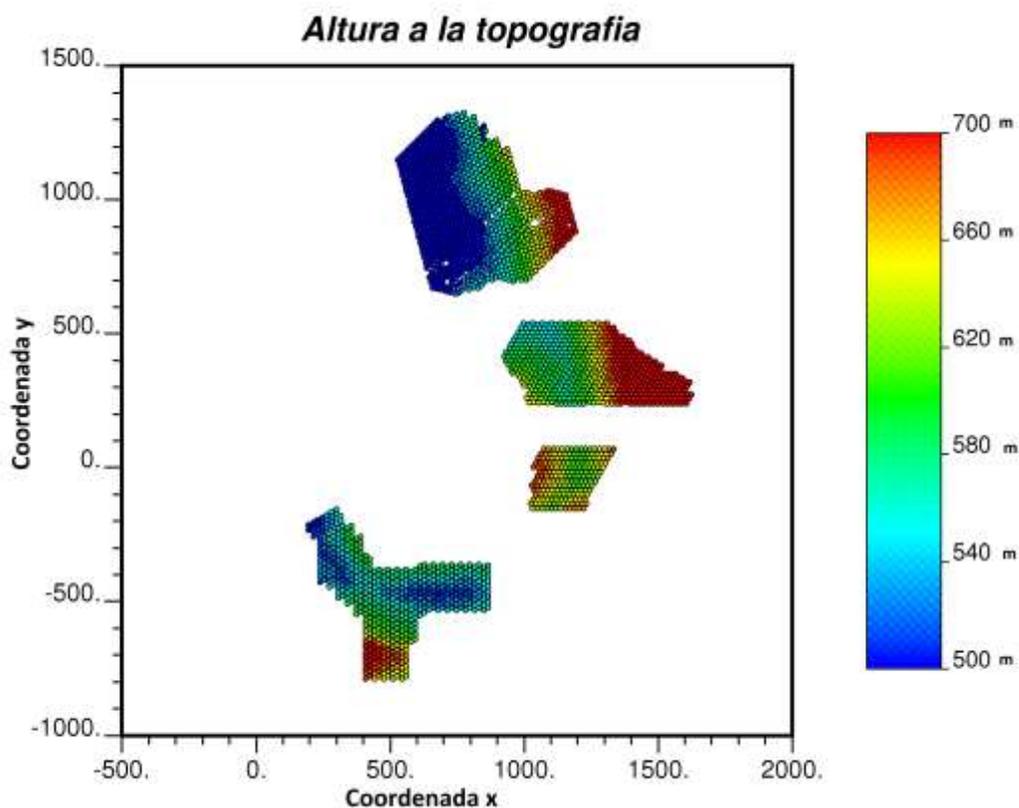


Figura 27: Alturas de puntos de extracción a la topografía.

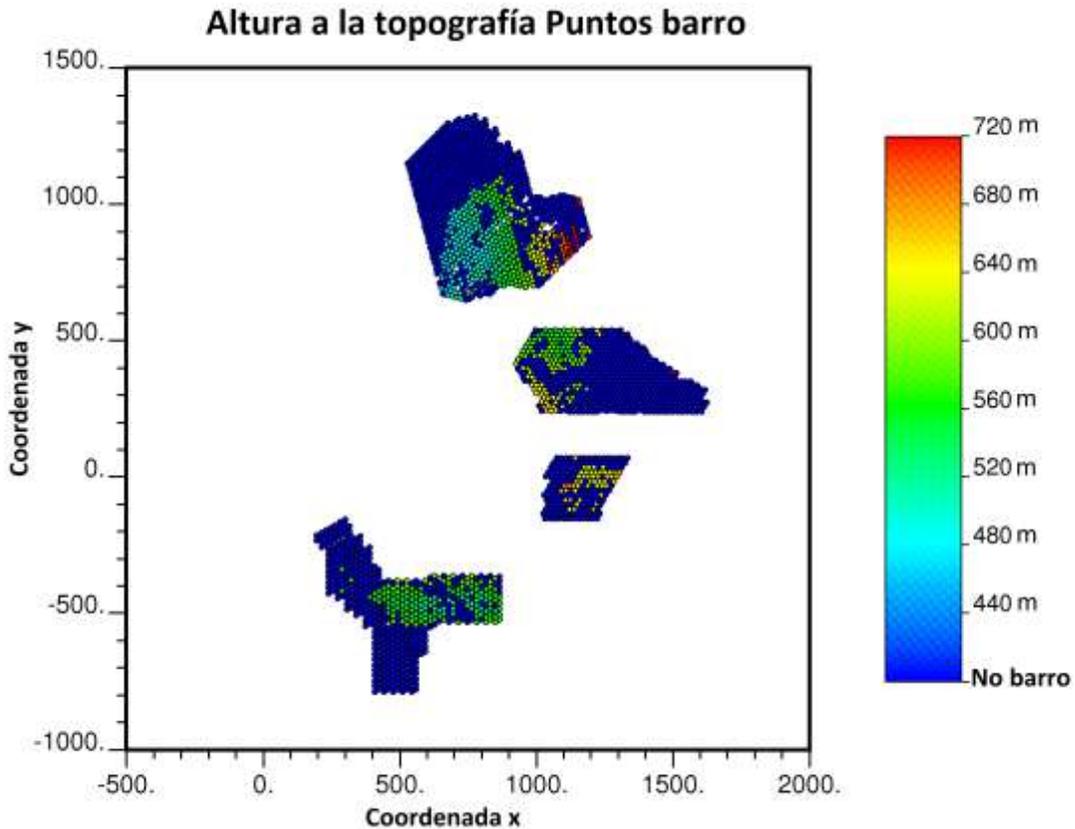


Figura 28: Puntos contaminados por barro y su distancia a la topografía.

Como se puede apreciar en la Figura 29, Figura 30, Figura 31 y Figura 32 las zonas de acumulación de agua en superficie coinciden con los flujos superficiales de agua de DET. Además, si se extrapolan los puntos barro con el canalón, es posible apreciar que la concentración de puntos barro presentan en el centro el canalón.



Figura 29: Canalón y flujos de aguas para el sector Reservas Norte.

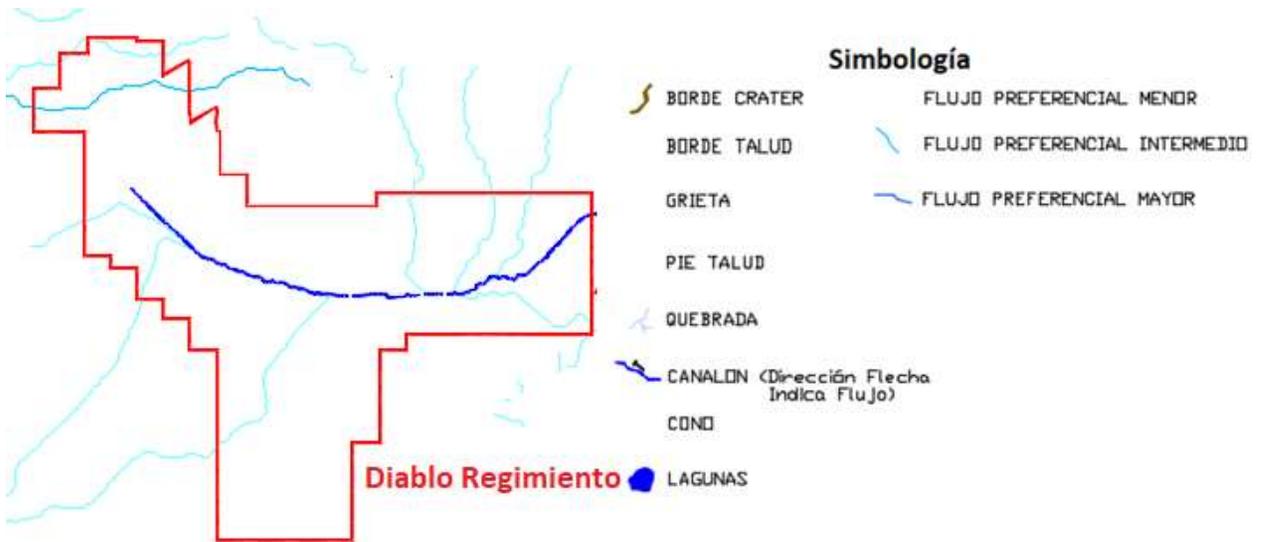


Figura 30: Canalón y flujos de aguas para el sector Diablos Regimiento.

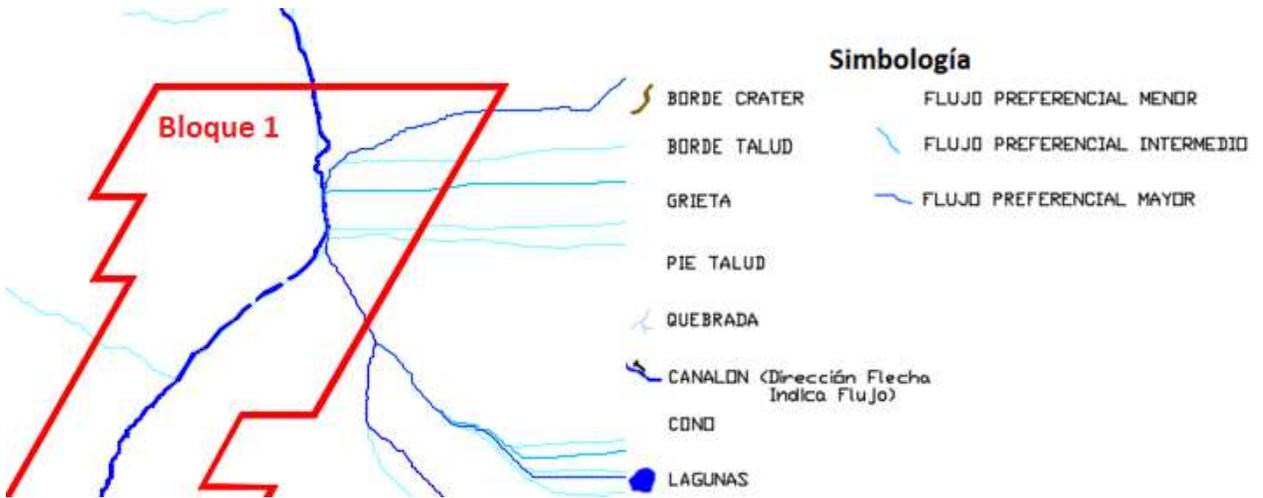


Figura 31: Canalón y flujos de aguas para el sector Esmeralda Bloque 1.



Figura 32: Canalón y flujos de aguas para el sector Esmeralda antiguo.

### 3.3 Fragmentación

Si se observa la fragmentación de los sectores<sup>1</sup>, en base a la zonación geotécnica de DET, es posible apreciar que la mayoría de los puntos contaminados por barro presentan una fragmentación de regular a muy fina (ver Figura 33 y Tabla 7), es decir se corrobora lo enunciado por Butcher (et al, 2000) que el material fino es uno de los principales elementos para la generación de barro.

Por otro parte, existe un 10% de los puntos contaminados que posee fragmentación gruesa, dichos puntos son contaminados de forma lateral, que es un ingreso temprano de barro asociado a un punto aledaño que se contamina.

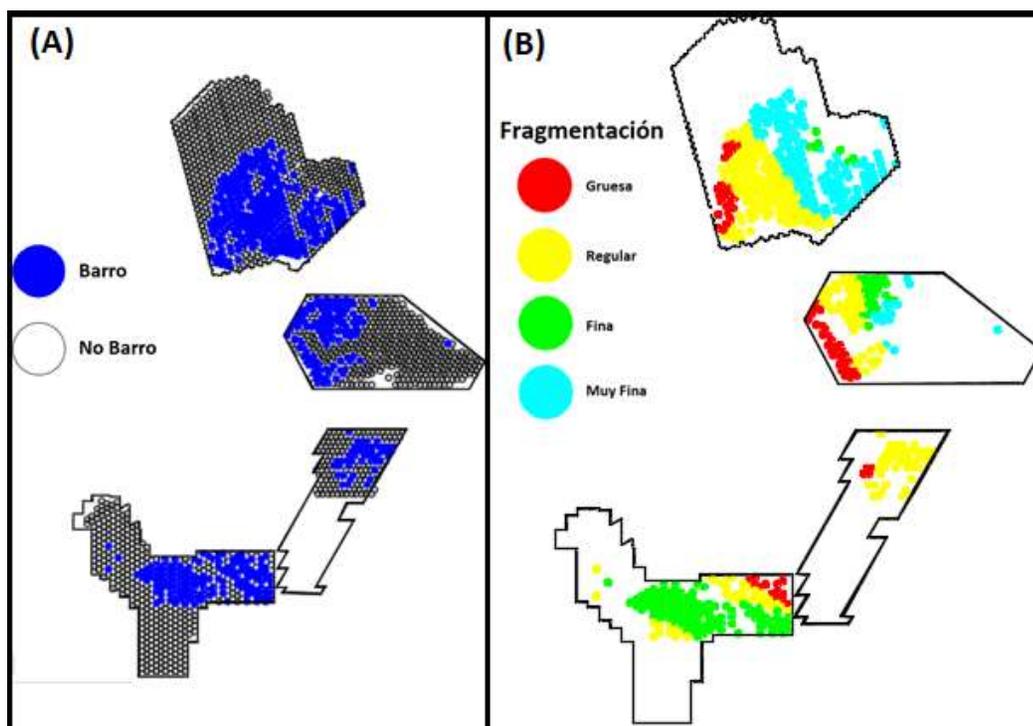


Figura 33: (A) Puntos contaminados y no contaminados por barro. (B) Fragmentación puntos contaminados por barro.

Tabla 7: Proporción puntos contaminados por barro.

Fragmentación	Proporción del total puntos barro[%]
Muy Fina	24
Fina	24
Regular	42
Gruesa	10

### 3.4 Barro en sectores superiores

La gran mayoría de los puntos de extracción contaminados por barro están bajo un sector que presento barro con anterioridad (ver Figura 34). No obstante, como se observa en la Figura 34,

<sup>1</sup> En el Anexo B se presenta la distribución general de la fragmentación de los sectores.

en el RENO existen puntos fuera de la sombra de barro que presentan contaminación. Estos puntos, como se apreció en la sección 3.3, presentan una granulometría muy fina, lo que explicaría el porqué de su contaminación.

La información del barro en sector antiguo, debe ser complementada con la altura de primario, ya que esta es la distancia hacia los sectores antiguos (o fuente generadora de barro), sin embargo, hay que tener en consideración que ocurrió con ese barro con el paso del tiempo, debido a que este puede bajar su contenido de humedad, porque el barro se compacta y se seca (esto último está fuera de los alcances de este trabajo y no será analizado).

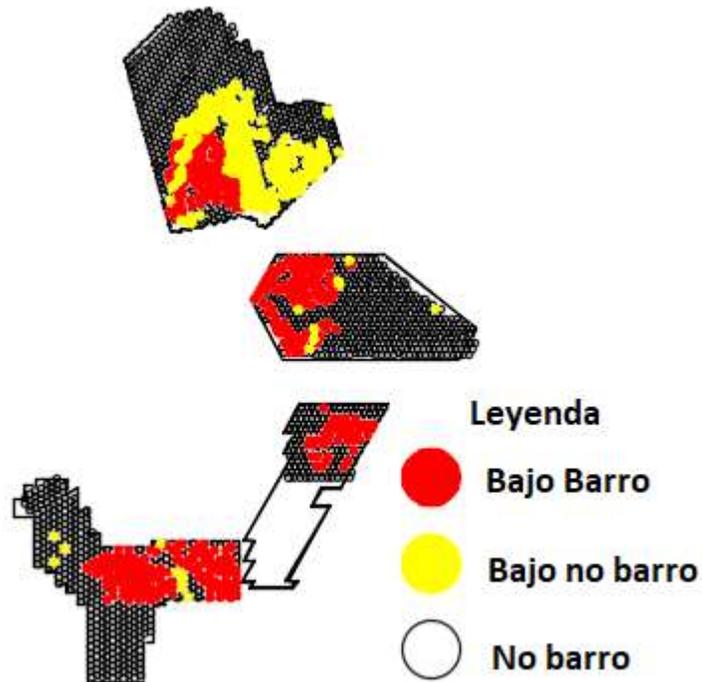


Figura 34: Puntos contaminados por barro y si poseen un sector superior contaminado por barro.

### 3.5 Uniformidad

#### 3.5.1 Contaminación Vertical

En base a la definición de contaminación vertical propuesta en este trabajo, se puede apreciar que la uniformidad no tiene influencia para los puntos contaminados verticalmente. Debido a, que no existe relación entre el tonelaje extraído uniforme y el porcentaje de extracción de los puntos, como se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 35 del bloque 1 de Esmeralda, (el resto de los sectores poseen el mismo comportamiento y para mayor detalle se sugiere ver el Anexo C).

La uniformidad no tiene influencia en este tipo de puntos, debido a que al ser el primer punto contaminado de la vecindad, el barro solo puede provenir desde altura (en base a la definición). Es por este motivo, que no afecta la regularidad con que baje la columna, más bien afecta la velocidad con que baja el barro hacia el punto de extracción.

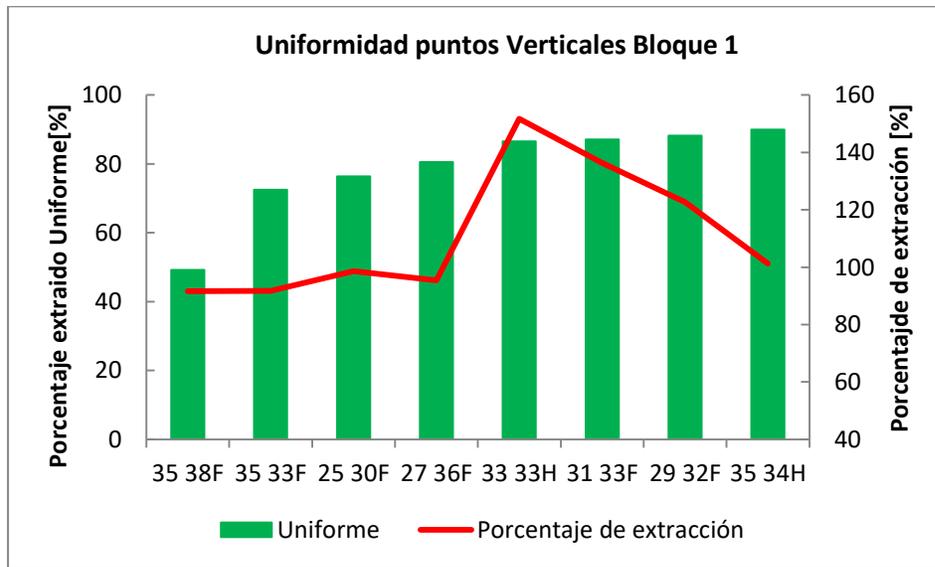
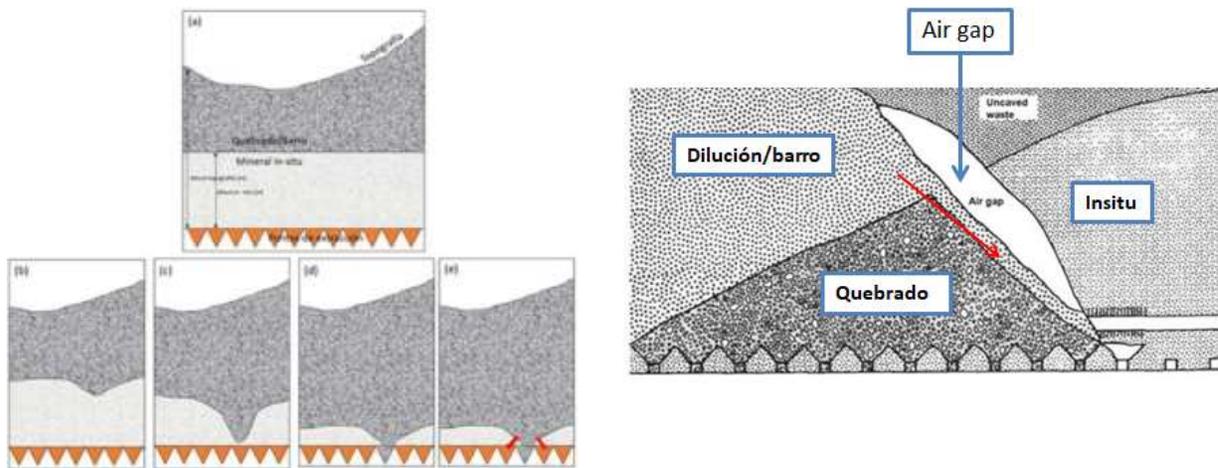


Figura 35: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, Esmeralda bloque 1.

### 3.5.2 Contaminación Lateral

La uniformidad toma mucha relevancia en la contaminación lateral (ver Figura 36 para los tipos de contaminación lateral), debido a que como se aprecia en la Figura 37 (y en el resto de sectores en el Anexo D), puntos con baja uniformidad presentan menor porcentaje de extracción de la columna de roca primaria, con valores por debajo del 100% en algunos casos. Esto se produce porque menor uniformidad indica que uno de los puntos de la vecindad se le extrajo un mayor tonelaje generando un flujo de ingreso temprano del barro hacia el punto o sus vecinos, reduciendo la altura extraíble.



(A) Contaminación Lateral

(B) Contaminación lateral en altura

Figura 36: Esquemas de contaminación lateral. (A) contaminación lateral asociada a un punto. (B) Contaminación lateral en altura.

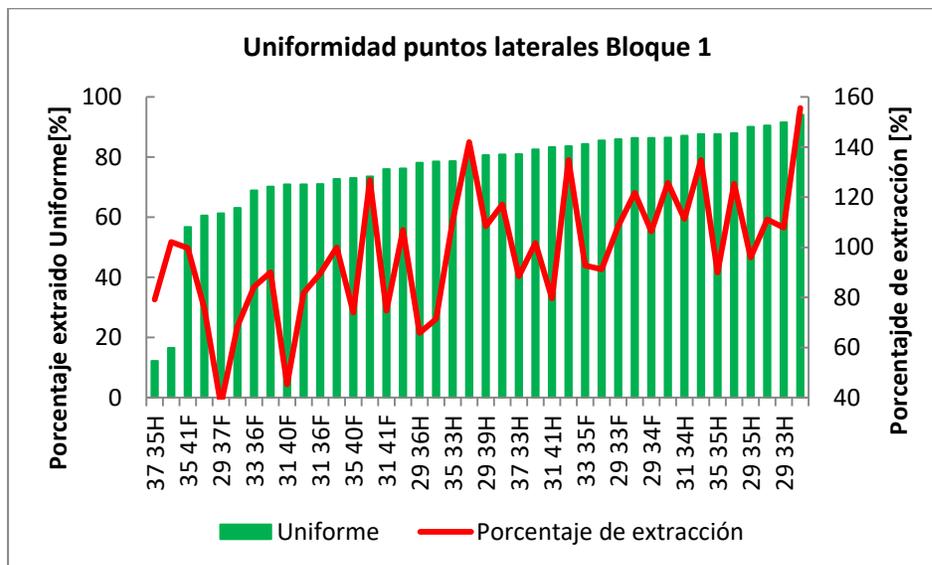


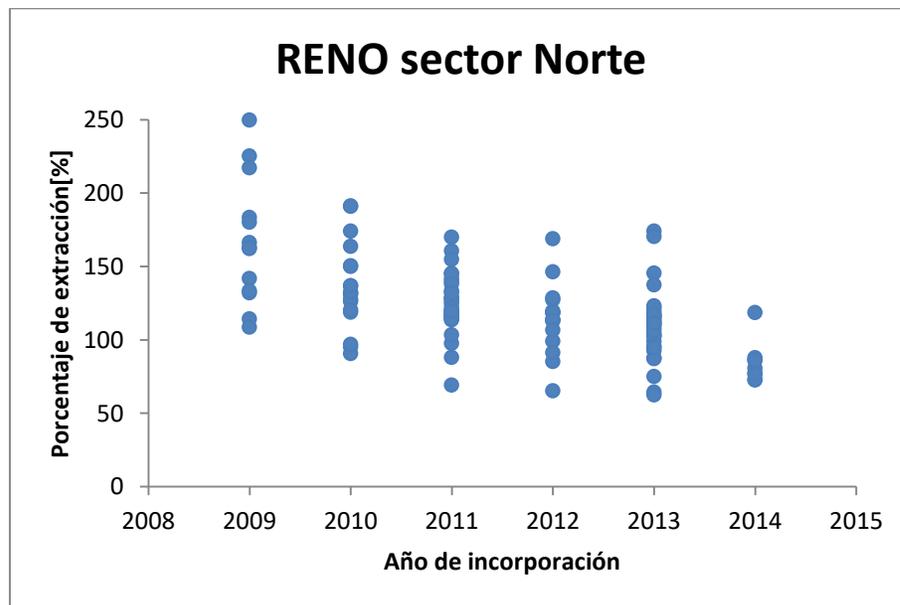
Figura 37: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, Esmeralda Bloque 1.

A pesar de esto, existe una pequeña fracción de los puntos que presentan comportamiento distinto al de la mayoría (mayor uniformidad menor extracción o menor uniformidad y mayor extracción). No obstante, esta fracción de puntos presentan otros factores que retardan o aceleran el ingreso de barro (cabe recordar que el fenómeno de la contaminación por barro es multivariable y no es posible atribuir solo a una variable), sin embargo, la tendencia general es el aumento de la altura extraída acorde a un aumento en la uniformidad.

### 3.6 Secuencia de Incorporación

DeWolfe (1981) advierte que es esencial para el control de la entrada de dilución realizar una extracción que permita que el espacio vacío (air gap, ver Figura 9) que se genera entre la pila de material fragmentado y la zona de fractura sea propicio para la propagación de la fragmentación de material in-situ sin que el volumen permita el escurrimiento de material diluyente previamente quebrado. Esto puede ser asociado directamente con el barro, ya que es una forma de dilución, y puntos que sean incorporados más tardíos y tengan un bajo control del air gap (extracción muy alta, permitiendo que el material diluyente fluya por el air gap), tendrán una contaminación más temprana.

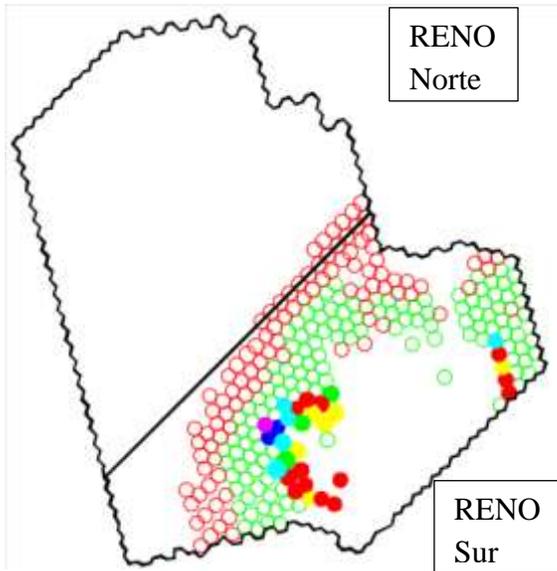
Basándose en DeWolfe(1981), se comprobó empíricamente con datos de Reservas Norte sector norte que los primeros puntos contaminados por barro se les puede extraer un mayor porcentaje de la altura de columna de primario, sin embargo, a medida que la secuencia avanza en el tiempo, los puntos declarados barros comienzan a ser cerrados a porcentajes menores, como se puede apreciar en la Figura 38.



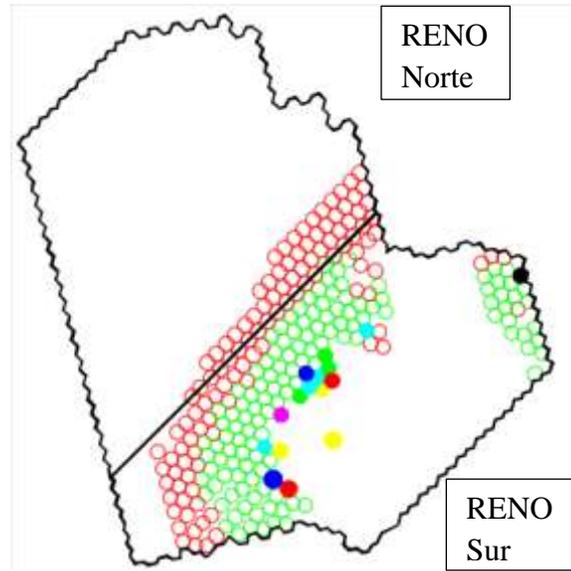
**Figura 38:** Puntos declarados barro con su porcentaje de extracción y el año en que fue incorporado, RENO sector Norte.

No obstante, es necesario corroborar que dicha tendencia tiene una relación espacial, debido a que si los puntos están asilados el fenómeno no presenta ningún sentido físico. Sin embargo, si se observa la secuencia de incorporación del RENO (ver Figura 39), desde el año 2009 en adelante comienza la incorporación de la parte norte. Los primeros puntos incorporados son los primeros en ser contaminados (los que ocurren en año 2014 con porcentajes de extracción por sobre los 180%). Luego, los puntos se van contaminando acorde a secuencia de incorporación, además van disminuyendo su porcentaje de extracción, el cual va disminuyendo desde el 180% que son los primeros puntos hasta bajo el 120% de la altura de primario. Es así, como se logra apreciar que para el año 2016 y 2017, el porcentaje de extracción está por debajo el 120% de la columna de extracción y estos puntos corresponden a los incorporados el 2013 y 2014.

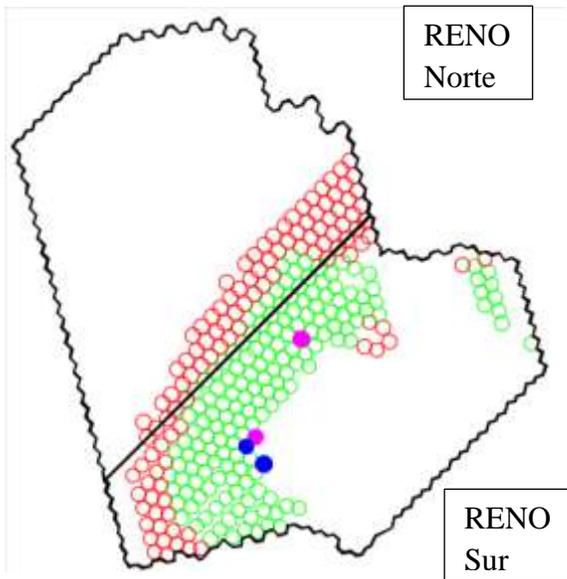
La Figura 39, también incorpora parte de los puntos del sector sur que han sido contaminados, donde también se logra apreciar la misma tendencia observada en la parte norte, pero en este sector entre los años 2009 y 2012, donde la aparición de los puntos contaminados por barro tienen la misma dirección que la secuencia de incorporación, sumado a la disminución del porcentaje de extracción a medida que aparecen los puntos contaminados.



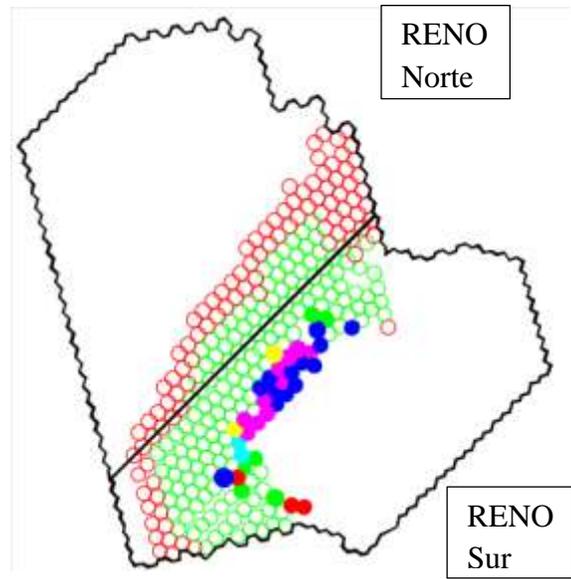
(2009)



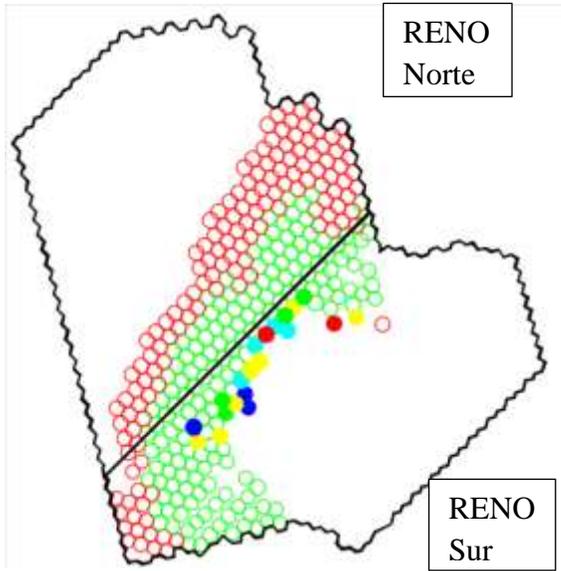
(2010)



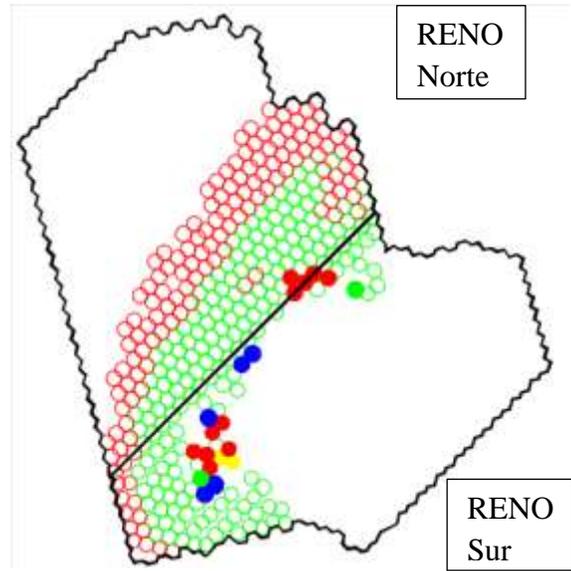
(2011)



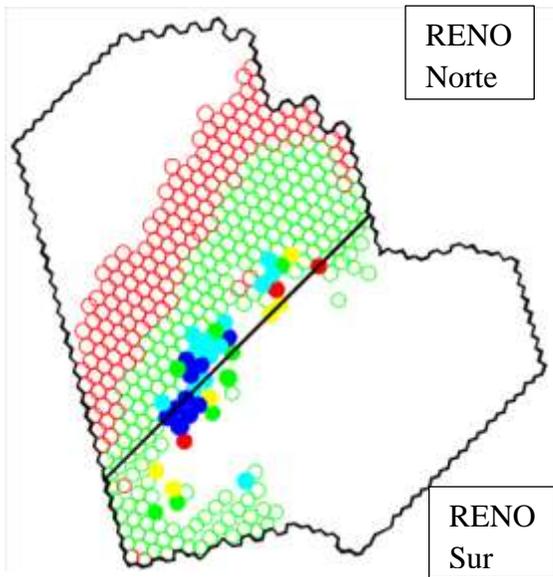
(2012)



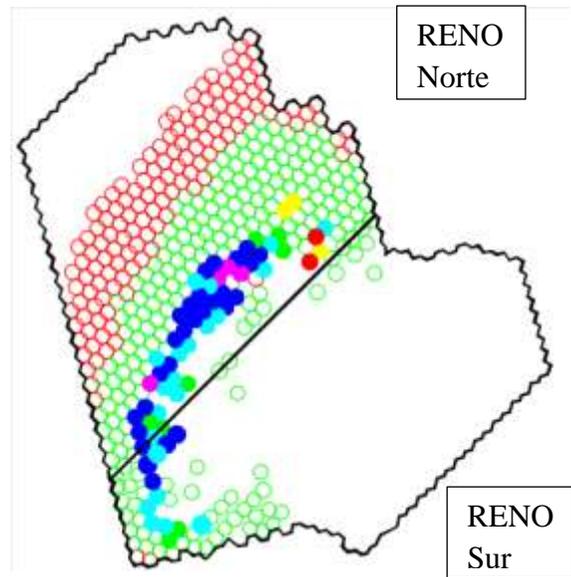
(2013)



(2014)



(2015)



(2016)

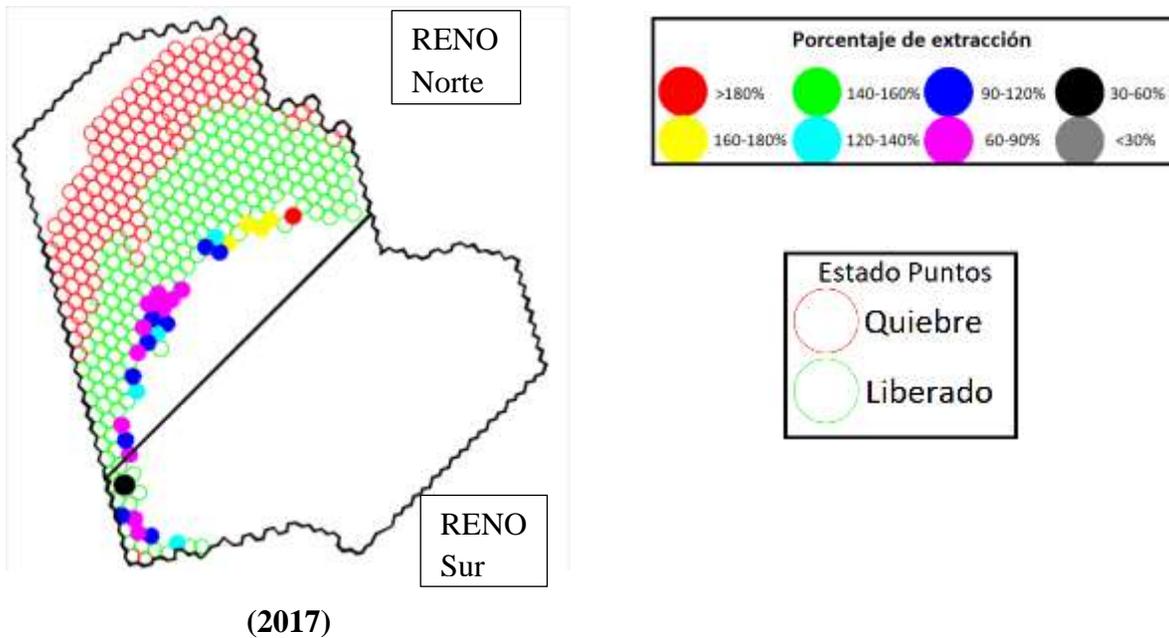


Figura 39: Estado de los puntos año a año, con la fecha de declaración de barro y su porcentaje de extracción.

### 3.7 Análisis de resultados

Del capítulo, se logró corroborar la influencia de la altura de primario y a la topografía en el fenómeno de la contaminación por barro, enunciado por Navia (2014), Pérez (2017) y BCTEC (2018). En ambos casos una menor altura de la variable, aumenta la probabilidad de ingreso de barro.

Los puntos contaminados por barro para los sectores presentan alturas de 110 a 180 metros, donde la gran mayoría de datos se ubican cercanos a los 150 metros.

Por otra parte, la relación existente entre la altura a la topografía y el canalón, es evidente, ya que ambos representan una zona de acumulación de agua en superficie. Sin embargo, el análisis del canalón realizado por Navia (2014), presenta que este refleja un área más acotada, en comparación a la que representa la altura a la topografía, analizada en este estudio.

Si se utiliza como criterio de planificación la zona de acumulación o barro en sector antiguo (ya que todos los puntos bajo estas zonas están contaminados por barro), se puede llevar a la toma de decisiones muy conservadoras, ya que gran parte de los puntos contaminados en los sectores se producen por contaminación lateral y no por estar bajo una de las dos zonas.

La fragmentación es uno de los resultados interesantes y a la vez esperados, debido a que varios autores declaran como el material fino principal generador de barro (siendo Butcher (et al, 2000) el primero en plantear dicha afirmación), algo que no había sido comprobado con datos de la operación. Además, esto puede ser relacionado con lo propuesto por Montecino (2011) sobre la fragmentación secundaria de la columna de extracción, ya que al aumentar la extracción disminuye la fragmentación lo que es otra agravante para el aumento de la probabilidad de ingreso de barro.

Además, la fragmentación gruesa presenta una baja probabilidad de ingreso de barro, sin embargo cuando un punto con dicha granulometría se contamina, generalmente lo hace por contaminación lateral.

Si bien la contaminación de puntos por barro es un riesgo inherente de la minería, se hace necesario aceptarla y tenerla en cuenta dentro de la planificación y el negocio minero. Aceptándola, como contaminación vertical (ya que el barro está presente en DET), pero controlando la contaminación lateral, ya que como se logró apreciar en el capítulo la extracción de forma uniforme de los puntos aumenta el porcentaje de extracción de los puntos contaminados lateralmente por barro o propensos a serlo. Sin embargo, la contaminación vertical dependerá del sector donde esté emplazado, y la rapidez con que se alcance la fuente generadora de barro.

La contaminación lateral en altura, se logra comprobar empíricamente con la secuencia de incorporación, donde los puntos incorporados en primera instancia logran extraer sobre el 180% de la columna de primario. Luego, los puntos contaminados son declarados barro, acorde como fue la geometría del frente de hundimiento y en un orden muy similar a este. Donde los puntos contaminados más tardíos logran recuperar porcentajes bajo el 120% e extracción.

De este capítulo, es posible extraer que las diferentes variables que afectan el fenómeno son muy similares entre los diferentes sectores estudiados (por ende, diferentes tipos de malla), como por ejemplo la altura de primario, altura a la topografía, fragmentación, barro en sector antiguo y secuencia de incorporación. No obstante, la uniformidad para puntos laterales y verticales es uno de los factores que presenta una diferenciación más marcada que las otras variables, es por este motivo que es uno de los principales criterios para poder aislar la variable de diseño en el análisis de la contaminación por barro y reducir los efectos de las demás factores en el estudio.

## 4 ANÁLISIS DE LA MALLA DE EXTRACCIÓN

Antes de analizar el efecto de la malla de extracción en el ingreso de agua barro es necesario aislar la variable de diseño, tratando de dejar fijas las otras variables que afectan el fenómeno.

En el capítulo 3, se apreció la influencia de las variables estudiadas, exceptuando la malla de extracción. En base a los análisis de esa sección, se establecen los criterios sobre el resto de variables para evaluar y comparar los diferentes diseños. Estos supuestos se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros a considerar para evaluar la influencia de la malla de extracción.

Factor	Criterio
Altura de primario	Estandarizada con el Porcentaje de extracción.
Altura a la topografía	Todos los sectores presentan zona de acumulación, no se considera.
Fragmentación	Puntos contaminados con fragmentación gruesa, regular y fina.
Barro en sector antiguo	Todos los sectores presentan barro en sector antiguo, no se considera.
Secuencia de incorporación	No se considera su efecto, ya que ocurre en todos los sectores.
Uniformidad	Considerado solo para los laterales y divididos en los uniformes y no uniformes, con un tonelaje extraído sobre el 90% uniformemente.

Por otra parte, el estudio busca corroborar la hipótesis de que una malla de mayor tamaño tiene una menor interacción de los elipsoides de extracción, por ende el punto conectará más rápido con el barro o fuente de agua presente en niveles superiores, es por este motivo que se contamina antes, en cambio, una malla de menor tamaño tiene mayor interacción permitiendo que el material diluyente baje de forma regular y que todos los puntos bajen muy similares entre sí, produciendo una conexión más lenta con la fuente de barro.

Debido a lo anterior, este capítulo solo busca determinar, con datos históricos, si ocurre el fenómeno planteado en la hipótesis. La interacción de los elipsoides será abordada en el capítulo 6, mediante el modelo numérico de simulación de flujo.

### 4.1 Contaminación vertical

La contaminación vertical de los puntos presenta que la malla de menor tamaño es la que mayor porcentaje de extracción de la columna de primario se puede extraer, corroborado por el histograma (ver Figura 40), media y mediana de los datos (ver Tabla 9), donde la mayor concentración de puntos se produce a porcentajes mayores.

Por otra parte, las mallas de tamaños 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m], presentan comportamientos diferentes dependiendo del sector del histograma a analizar. Sin embargo, es claro notar que

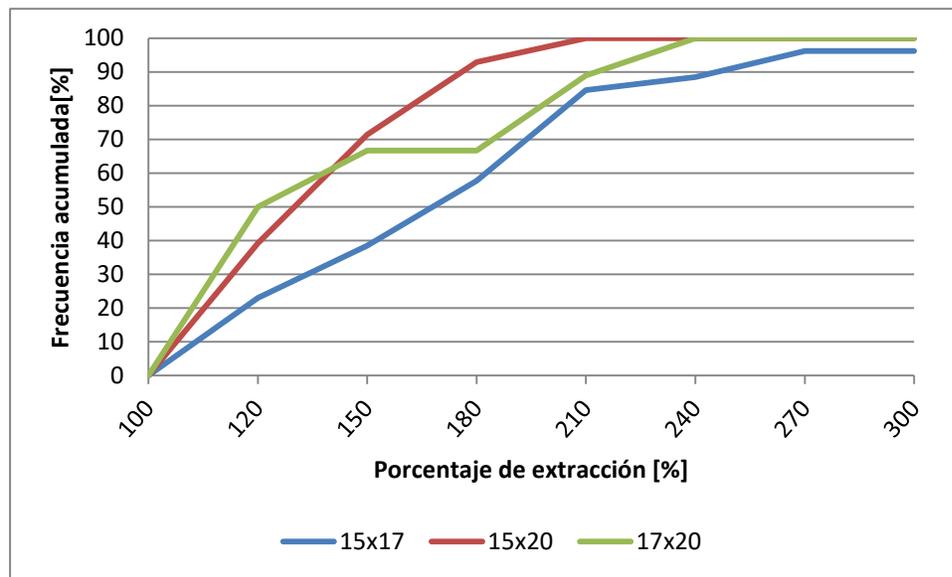
existe un cambio de comportamiento al 140% de la columna de extracción de primario, aproximadamente, donde se concentra el 60% de los datos.

Por lo tanto, si se analiza los puntos contaminados por barro verticalmente y que se les ha podido extraer hasta el 140% de la columna de extracción, la malla de 15[m]x20[m] tiene una menor concentración de datos que una malla de 17[m]x20[m]. Sin embargo, estas dos mallas presentan comportamientos muy cercanos.

Sobre el 140% los datos de la malla 17[m]x20[m] están desplazados a porcentajes mayores, en comparación con la malla 15[m]x20[m], es decir, la malla más grande presenta mayor cantidad de puntos con porcentajes de extracción mayores.

**Tabla 9: Media y mediana puntos contaminados verticalmente por tipo de malla.**

	15x17	15x20	17x20
<b>Media [%]</b>	169	131	144
<b>Desviación estándar [%]</b>	51	29	50
<b>Mediana [%]</b>	168	129	126



**Figura 40: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos contaminados por barro verticalmente, según tipo de malla.**

## 4.2 Contaminación lateral

Para analizar los puntos contaminados lateralmente, es necesario diferenciar aquellos que se extraen con buena uniformidad de los que no, ya que como se pudo apreciar en la sección 3.5.2, a mayor uniformidad mayor es el porcentaje de extracción. Debido a este motivo, se analizar los puntos con uniformidades mayores al 90% (uniformes) y los bajo este valor de corte (no uniformes).

#### 4.2.1 Puntos uniformes

Observando el histograma acumulado de la Figura 41 y considerando como ejercicio de análisis el 60% de la fracción acumulada, es claro notar que las mallas 15[m]x17[m], 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m], los datos se concentran bajo los porcentajes de extracción de 190%, 150% y 130%, respectivamente. Este ejemplo, muestra que mallas de mayor tamaño permiten un menor porcentaje de extracción de los puntos.

Si se observa la media y la mediana de los datos (ver Tabla 10), la media no representa la tendencia observada en el histograma, ya que la malla 15[m]x20[m] presenta un mayor porcentaje de extracción. No obstante, los datos extremos bajo el 100 % de extracción y sobre el 200%, explican la gran concentración de datos de la malla 15[m]x20[m], cuya distribución es más acotada que las otras dos.

Por otra parte, si se analiza la parte inferior de los gráficos, bajo el 100% de extracción de la columna de primario (que representa el 20 % de los datos) estos no presentan una relación con respecto al ingreso de barro. En este tramo, toma mucha importancia la secuencia de incorporación, ya que como se logró apreciar en la sección 3.6, el desfase de los puntos y el efecto del “rilling” permite un ingreso prematuro del barro a puntos que recién se están incorporando.

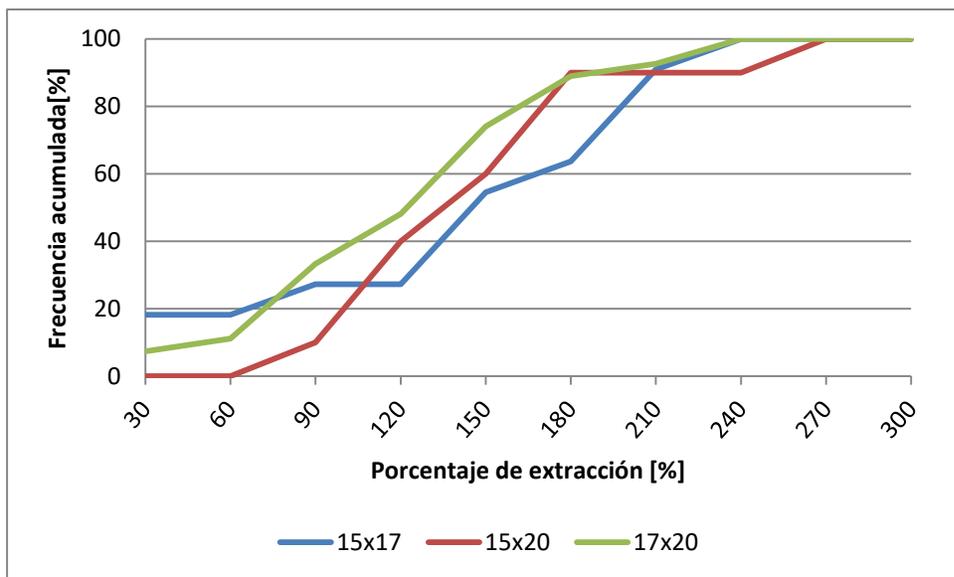


Figura 41: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos contaminados por barro lateralmente, según tipo de malla y uniformidad mayor al 90%.

Tabla 10: Media y mediana puntos contaminados lateralmente uniformes por tipo de malla.

	15x17	15x20	17x20
Media [%]	134	141	121
Desviación estándar [%]	73	47	52
Mediana [%]	149	138	126

#### 4.2.2 Puntos no uniformes

Como se puede apreciar en la Figura 42, los puntos contaminados no uniformes presentan la tendencia general asociada a la malla, diseños más grandes presentan una concentración de puntos más cercanos a porcentajes de extracción menores. No obstante, en la condición no uniforme se hace más relevante el porcentaje de extracción (o altura) para mallas menos espaciadas, ya que si se realiza el ejercicio de considerar el 60% de los datos, la malla 15[m]x17[m], 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m] presentan porcentajes de extracción de 170%, 130% y 120%, respectivamente.

Por otra parte, las mallas 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m] en la condición no uniforme presentan un comportamiento similar, recuperando un porcentaje de extracción muy cercano.

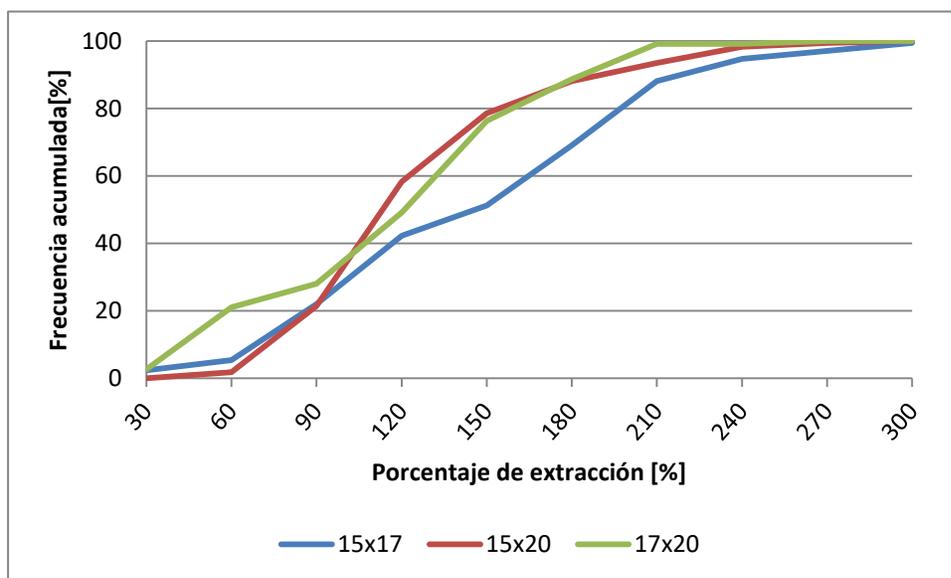


Figura 42: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos contaminados por barro lateralmente, según tipo de malla y uniformidad menor al 90%.

Tabla 11: Media y mediana puntos contaminados lateralmente no uniformes por tipo de malla.

	15x17	15x20	17x20
Media [%]	143.3	124.3	116.6
Desviación estándar [%]	144.6	116.6	123.1
Mediana [%]	59.7	44.5	50.3

#### 4.3 Puntos declarados limitados

La Figura 43 presenta el histograma acumulado de los puntos declarados limitados, donde se puede apreciar que no existe una tendencia o predominancia de un tipo de malla sobre otra. Sin embargo, es claro notar en la figura que existe un aumento de la concentración de puntos entre los 120% y 160% de la extracción, lo cual va de acuerdo con las políticas de DET, ya que por sobre el 130% de la altura de columna de extracción de primario (o Insitu), los puntos son declarados limitados.

A pesar de lo anterior, el 70% de los puntos limitados para cada tipo de malla se declaran limitado entre el 100% a 120%. Esto tiene relación con los primeros puntos declarados barro que aproximadamente se contaminan al 100% de la altura de primario, donde por políticas de DET los puntos aledaños se declaran limitados.

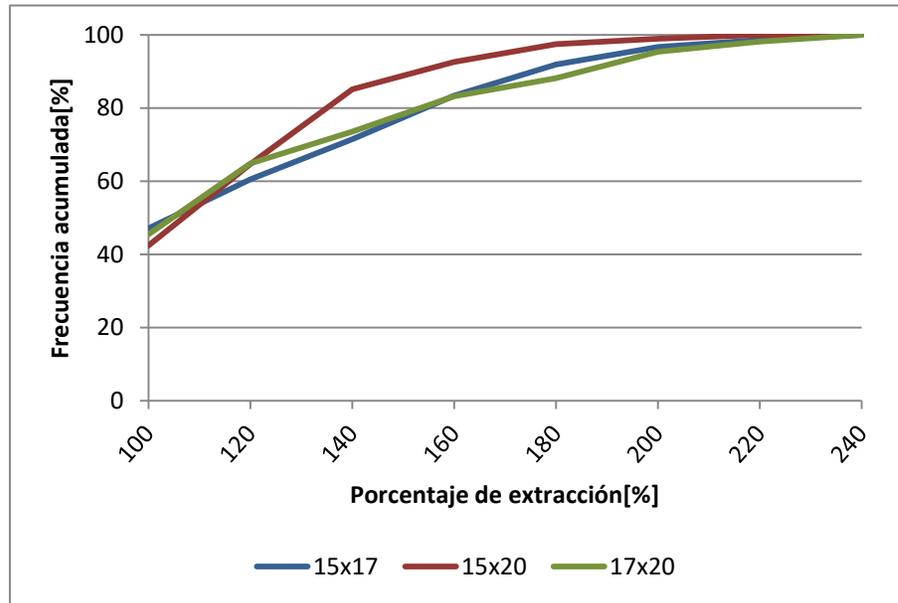


Figura 43: Histograma acumulado del porcentaje de extracción de altura de primario puntos declarados limitados, según tipo de malla.

Tabla 12: Media y mediana puntos declarados limitados por tipo de malla.

	15x17	15x20	17x20
Media [%]	1.160	1.090	1.049
Desviación estándar [%]	1.178	1.097	1.032
Mediana [%]	0.645	0.402	0.538

#### 4.4 Análisis de resultados

Existe una relación estadística entre el porcentaje de extracción y la malla, ya sea para puntos contaminados verticalmente, lateralmente y puntos extraídos de manera uniforme. A pesar de que la diferencia entre tipos de mallas es distinta conserva la tendencia general que a menor tamaño de la malla mayor es el porcentaje de extracción al que ingresa el barro.

De los resultados obtenidos, se puede apreciar que las mallas 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m], presentan un comportamiento muy similar desde el punto de vista del porcentaje de extracción de ingreso de barro. Solo los puntos extraídos uniformemente presentan una diferencia significativa entre cada tipo de malla, cercana al 20%. En cambio, para los otros casos las diferencias son menores al 10%.

El comportamiento similar entre las mallas más grandes y el mayor porcentaje de extracción de la malla de menor tamaño, genera la pregunta si en realidad existe interacción de los elipsoides extracción. Debido a que si analizamos el concepto de interacción, los puntos de extracción más espaciados se asemejarían a un tiraje aislado, permitiendo que el punto de extracción conecte más

rápido con el barro presente en un nivel superior, teniendo una uniformidad baja, en cambio, en puntos menos espaciados habría tiraje interactivo mejorando la uniformidad y reduciendo la velocidad con que conecta con la cavidad de barro en superficie, ya que la columna de mineral y de barro bajarían de forma más pareja.

Lo anterior, explicaría que las mallas 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m] tengan un comportamiento similar, debido que no tendrían interacción y tardarían poco en conectar con la cavidad de barro. Además, si se asocia con la fragmentación secundaria en altura, al pasar un porcentaje de extracción disminuiría la interacción, ya que el elipsoide es de menor tamaño, tal como se puede apreciar en los puntos contaminados verticalmente, donde bajo el 140% la malla 15[m] presenta menos puntos contaminados, en cambio, sobre 140% presenta más puntos que la malla 17[m]x20[m],

Por último, el análisis de los puntos limitados no refleja mayor diferencia entre mallas y para todos los puntos está muy concentrado (70% de los datos) entre el 100% a 140%. Esto se debe a que la declaración de un punto limitado viene más por una decisión “política” del ingeniero a cargo y la DET de limitar los puntos vecinos a uno contaminado por barro por medidas de seguridad. Sumado a esto, la gran mayoría de los puntos contaminados por barro como se pueden observar en todas las gráficas del capítulo, están por debajo el 150% de extracción, por ende los puntos vecinos están cercanos a ese valor, lo que explica la declaración de limitados a ese porcentaje.

Por otra parte, los puntos declarados limitados por sobre el 140% responden a la medida de DET de limitar dichos puntos para evitar o retrasar el ingreso temprano de la dilución

## 5 MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

El modelo analítico realizado en este trabajo se basó en una regresión logística, debido a la flexibilidad que presenta esta herramienta para aceptar variables de cualquier naturaleza, ya sean continuas o categóricas, y entregando como resultado un probabilidad de ocurrencia del fenómeno estudiado.

La base de datos a utilizar en el modelo de regresión logística considera el último estado del punto hasta la fecha de diciembre del 2017.

Las variables consideradas en la regresión logística se presentan en la Figura 45, donde cabe destacar que existen variables del análisis exploratorio que se adaptaron para el análisis o simplemente no se consideraron, debido a que el comportamiento de dichos factores está influenciado por los puntos vecinos y las características operacionales de estos, estas variables se detallan en la Tabla 13.

**Tabla 13: Variables operacionales y su forma considerada en el modelo.**

Variable	Forma en el modelo	Razón
Contaminación lateral	Vecino barro	La cantidad de puntos vecinos contaminados barro, aumentaran la probabilidad de que se contamine otro punto.
Secuencia de incorporación	No considerada	Tiene relación con el ingreso a barro lateral, sin embargo depende mucho de las condiciones de extracción de los puntos, por simplicidad del modelo no se utiliza y es considerada en el vecino barro.
Uniformidad	Porcentaje de extracción	Es considerada en la extracción de los puntos medida con el porcentaje de extracción.

Otra consideración importante dentro del modelo, es la fragmentación la cual fue transformada en una variable binaria, de manera de simplificar el modelo y generar una mayor precisión, debido a que la diferencia entre fragmentación muy fina, fina y gruesa no es muy significativa desde el punto de vista de la cantidad de datos (ver Tabla 7) y considerar cada variable por separado entregaría que una fragmentación regular tuviera mayor probabilidad de ingreso barro, por sobre las otras fragmentaciones, ya que la regresión logística considera la proporción de datos para ajustar el modelo. Es por este motivo, que se decidió agrupar los datos de acuerdo a la Figura 44.

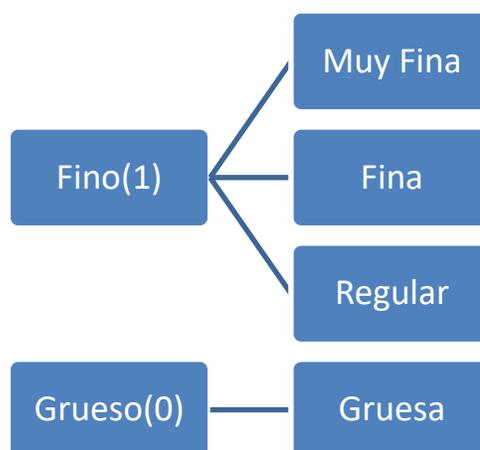
En la base de datos, los registros de agua-barro, deben corresponder a un cuarto del total de datos, en cambio, los eventos no raro o registros de no barro, deben corresponder a tres cuartas partes de la base de datos total (King & Zeng, 2001), sumado a esto la cantidad de datos totales deben ser muy cercanas entre tipo de malla, de manera de no aumentar el peso de una malla en el modelo, la Tabla 14 presenta los datos totales y los utilizados en la regresión. Cabe destacar, que

la malla 15[m]x20[m] se seleccionaron 550 datos aleatoriamente para conservar la proporción entre los tres tipos de malla. Además, para la malla 15[m]x17[m] no se consideró la parte sur de reservas norte, de manera de poder validar el modelo con otro sector que no haya sido parte de la construcción.

**Tabla 14: Cantidad de datos seleccionada para el modelo de regresión logística.**

	Nº puntos totales	Nº puntos barro	Puntos barro totales [%]	Nº datos Clúster	Puntos barro Clúster [%]
<b>15x17</b>	555	157	28	555	28
<b>15x20</b>	724	170	23	550	31
<b>17x20</b>	542	177	33	542	33
<b>Total</b>	1821	504	28	1687	29.8

Con los datos ajustados, se genera el modelo de regresión logística, en primera instancia de manera univariable, para obtener la relación de dependencia de los factores, y luego multivariable, de tal manera que los factores tengan sentido físico del fenómeno (representen la realidad) y estadístico.



**Figura 44: Transformación fragmentación variable binaria.**



Figura 45: Variables a considerar en el modelo de regresión logística.

## 5.1 Análisis Univariable

El análisis univariable busca determinar la dependencia de los datos con el fenómeno de contaminación por barro, para esto se utiliza un significancia máxima permitida del 20%, que tiene como fundamento aceptar con 80% de confianza que la variable estudiada afecta al fenómeno, sin embargo, si no se cumple con esta condición es necesario analizar la inclusión de la variable en el modelo multivariable, debido a que ese factor(sin relación, aparentemente) explique el suceso del barro en conjunto a otras variables.

Como se puede apreciar en la Tabla 15, existen dos variables que parecen no tener influencia estadística en el fenómeno, que son la malla de extracción y la fragmentación, debido a que su significancia estadística es muy mayor al 20%. No obstante, estos parámetros deben ser analizados en el modelo multivariable para analizar como varía su significancia en dicho modelo y cómo influyen en los ponderadores de las demás variables.

**Tabla 15: Análisis univariable de los factores estudiados.**

Variable	$\beta$	significancia
Altura de primario [m]	-0.004	$2 \times 10^{-13}$
Altura a la topografía[m]	-0.005	$10^{-13}$
Malla de extracción[m <sup>2</sup> ]	0.001	0.4
Fracción de extracción	0.277	$4 \times 10^{-8}$
Vecino Barro [entero]	0.64	$10^{-49}$
Barro sector antiguo [binaria]	1.898	$10^{-59}$
Fragmentación [binaria]	-0.017	0.87

## 5.2 Análisis multivariable

Antes de generar los modelos multivariable es necesario analizar la dependencia entre las variables que afectan al fenómeno, para no incorporar información redundante dentro del modelo. De lo anterior, ninguna variable es dependiente entre sí, exceptuando la altura Insitu con la altura de primario, que como se explicó en la sección 3.1, para las profundidades de los sectores estudiados, son muy similares, lo que estadísticamente entregara que son dependientes. El análisis de la dependencia de las variables se muestra en el Anexo F.

Del análisis univariable se encontraron dos variables que no presentan una significancia estadística asociada al fenómeno, sin embargo, componiendo dichos factores con las otros, generaran variaciones en los ponderadores por sobre el 20% , disminuyendo su significancia considerablemente y representando de manera matemática el fenómeno (ver Anexo G). En base a esto, no pueden ser eliminadas del análisis multivariable.

En la literatura se plantea como regla general, que los modelos multivariable de regresión logística no deben tener más variables, que un décimo del número de datos con presencia de fenómenos (Hosmer & Lemeshow, 2013). En base a esto, se probaron tres modelos, el primero utilizando todas las variables y el resto quitando las variables que no presenten significancia estadística o no tengan sentido físico.

Los tres modelos a probar fueron analizados son los Tabla 16, donde los modelos 2 y 3 surgen como consecuencia del modelo 1, al no cumplir estadísticamente en la descripción del fenómeno y por poseer variables sin sentido físico.

**Tabla 16: Variables a utilizar en los modelos a probar.**

Variable	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Altura de primario	X		X
Altura a la topografía	X	X	
Malla	X	X	X
Fragmentación	X	X	X
Barro sector antiguo	X	X	X
Porcentaje de extracción	X	X	X
Vecino Barro	X	X	X

### 5.2.1 Análisis de modelos

Para seleccionar el modelo que mejor ajusta, es necesario definir criterios de selección, los que para este estudio están basados en los estadísticos asociados a la regresión, sumados a que la variable tenga el sentido físico del análisis realizado en el capítulo 3 y la bibliografía asociada al fenómeno ( ver capítulo 2). Estos criterios son la significancia, el Odds ratio y la el ajuste del modelo de acuerdo al 2-log likelihood.

La significancia está asociada a cada variable del modelo, la cual debe ser menor al 5%, ya que con este valor se puede decir con un 95% de confianza que la variable tiene influencia en el fenómeno del barro.

El sentido físico de cada variable se aprecia con el odds-ratio (OR), ya que para valores OR mayores a 1 la variable aumenta la probabilidad del fenómeno, en cambio, OR menores a 1 disminuyen la ocurrencia del suceso, es con este criterio que se pueden descartar modelos que pueden tener ajustes muy buenos, pero que no representan la realidad.

Por último, asociado al modelo se analiza el -2 Log likelihood que es un estadístico que indica la calidad de ajuste entre los datos observados y los estimados. Mientras menor es el valor estadístico, mejor es el ajuste del modelo (Hosmer y Lemeshow, 2013), por lo que se busca el modelo con menor valor para este estadístico.

Como es posible apreciar en la Tabla 17, el modelo 1 se descarta con analizar el sentido físico de las variables y la significancia de estas, ya que la malla y la altura de primario, según el modelo a mayor sea el valor de estas variables menor es la probabilidad de ingreso de barro, lo cual va en contradicción con los análisis realizados y la literatura existente. Además, la significancia está muy por encima del 5%, lo que dice que estas variables no influyen en el modelo.

**Tabla 17: Resultados modelo 1.**

	B	Sig.	OR	-2 log Likelihood
<b>Fragmentación</b>	-0.6250	0.000	0.5350	1641,213
<b>Barro sector antiguo</b>	1.6410	0.000	5.1600	
<b>Vecinos barro</b>	0.3800	0.000	1.4620	
<b>Área</b>	0.0005	0.849	1.0005	
<b>Altura de primario</b>	0.0001	0.903	1.0001	
<b>Porcentaje extracción</b>	0.0300	0.000	1.0300	
<b>Altura a la topografía</b>	-0.0050	0.000	0.9950	
<b>Constante</b>	0.5780	0.567	1.7820	

Si se analiza la Tabla 18, el modelo 2 le resta importancia a la malla de extracción y a la constante (esta última involucra lo que el modelo puede omitir), ya que la significancia de estas variables esta sobre el 50%. Además, si se analiza el -2 log likelihood con los otros modelos (ver Tabla 17 y Tabla 19), es el que presenta el peor ajuste de los datos.

**Tabla 18: Resultados modelo 2.**

	B	Sig.	OR	-2 log Likelihood
Fragmentación	-0.624	0.000	0.536	1666,484
Barro sector antiguo	1.638	0.000	5.145	
Vecinos barro	0.380	0.000	1.462	
Área	0.001	0.805	1.001	
Porcentaje extracción	0.030	0.000	1.030	
Altura a la topografía	-0.005	0.000	0.995	
Constante	0.540	0.574	1.717	

El modelo 3 (ver Tabla 19) cumple con las tres criterios de selección, ya que todas las variables presentan significancia en el fenómeno menor al 5 %, tienen el sentido físico de los análisis realizados y el modelo global presenta un buen ajuste según el -2 log Likelihood. Este último, no es el mejor de los tres modelos, pero se acerca mucho a este que es el del modelo 1.

**Tabla 19: Resultados modelo 3.**

	B	Sig.	OR	-2 log Likelihood
Fragmentación	-0.522	0.000	0.593	1641,228
Barro sector antiguo	1.600	0.000	4.954	
Vecinos barro	0.410	0.000	1.506	
Área	0.005	0.027	1.005	
Altura primario	-0.002	0.017	0.998	
Porcentaje Extracción	0.010	0.032	1.010	
Constante	-3.117	0.000	0.044	

### 5.3 Análisis del modelo seleccionado

La Ecuación 13 presenta el modelo seleccionado, donde es posible apreciar el coeficiente beta de cada variable. De este coeficiente, surge la duda sobre el peso de los factores, debido a que por el valor del coeficiente pareciera que la altura de primario, la malla y extracción no tienen mucha influencia en la probabilidad del barro, sin embargo hay que tener en cuenta el orden de magnitud de estas variables, que para las tres variables mencionadas son de  $10^2$ .

$$\mathbb{P}(\text{barro}) = \frac{e^{-0.522F+1.6B+0.41V+0.005M-0.002P+0.01E-3.117}}{1 + e^{-0.522F+1.6B+0.41V+0.005M-0.002P+0.01E-3.117}}$$

Dónde:

F : Fragmentación (1 gruesa, 0 fina).

B : Barro en sector antiguo (1 si, 0 no).

V : N° vecinos barro (entero).

M : Área de influencia de la malla (m<sup>2</sup>).

P : Altura a la roca primaria (m).

E : Porcentaje de extracción (%)

**Ecuación 13: Modelo de regresión logística seleccionado.**

Por otra parte, el modelo seleccionado se calibro variando el porcentaje de corte para la decisión si el punto es barro o no barro, con los datos utilizados para su construcción. Encontrándose, que el valor de mejor ajuste para la probabilidad es de 0.687, que en los datos totales permite predecir el 60% de los puntos barro y un acierto global del 76%. Además, se encontró como el modelo ajustaba para cada sector en particular, obteniéndose ajustes globales por sobre el 65% y de puntos barro sobre el 50%, exceptuando el bloque 1 de Esmeralda que presenta un ajuste bajo (cercano al 35%), como se puede apreciar en la Figura 46.

De la misma forma como se calibro el modelo, se buscó validar con dos sectores no incorporados en la construcción, estos son la parte sur de reservas norte (que presenta un diferentes tipos de mallas interactuando) y el bloque 2 de Esmeralda, este último se incorporó para dar más robustez a la validación del modelo, debido a que es un sector no considerado dentro del estudio y que solo fue incorporado como medida de validación.

Los datos principales de los dos sectores para validar se presentan en la Tabla 20. Donde para el bloque 2 de Esmeralda el modelo predice 4 puntos como barro de uno que existe a la fecha del 2017, acertando al 95% del total, en cambio, para reservas norte en la parte sur el ajuste de los datos barro es cercano al 70%, con una estimación global del 67% (ver Figura 46). Este modelo presenta mejores ajustes que el realizado por BCTEC (2018), donde su acierto era cercano al 50% o inferior.

**Tabla 20: Sectores para validar el modelo.**

	Total puntos	Puntos barro
Bloque 2 Esmeralda	224	1
RENO sector sur	442	234

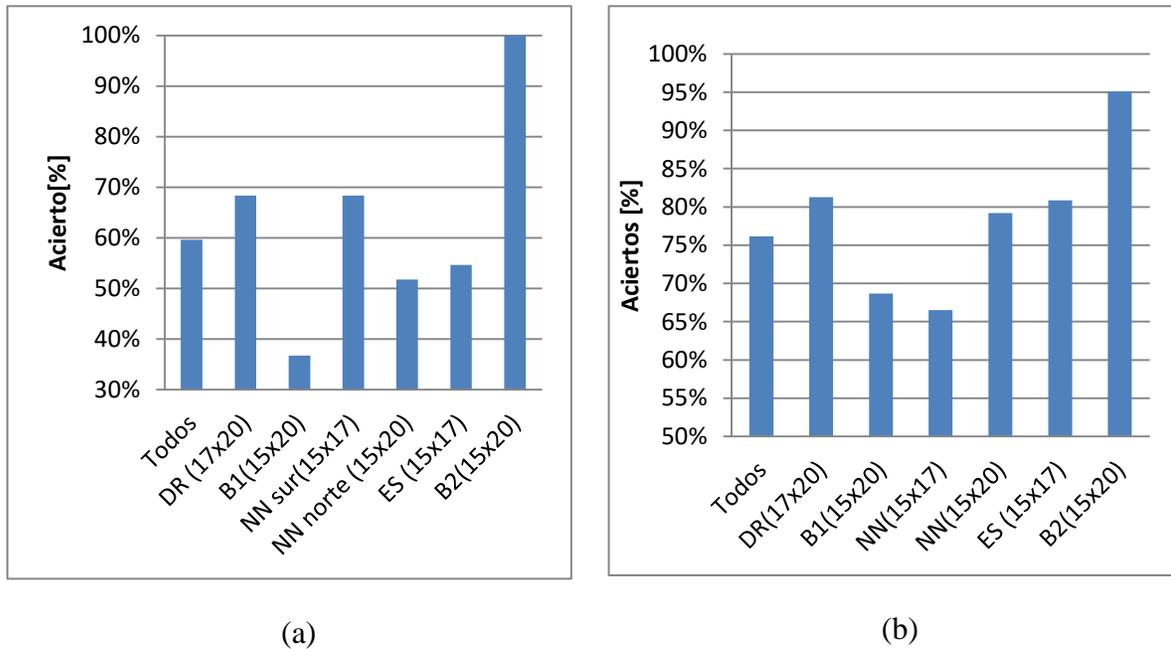


Figura 46: Porcentaje de aciertos del modelo. (a) aciertos puntos barro. (b) aciertos globales.

#### 5.4 Casos ficticios para determinar el peso de las variables.

Dentro de los resultados más relevantes de este estudio, se corroboró la influencia de la fragmentación y de la malla en el ingreso de agua barro. Sin embargo, la duda que surge es cuanto influyen estas variables en la contaminación. Es por este motivo que se plantean dos casos ficticios para determinar el peso de cada variable, estos se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21: Casos ficticios a analizar.

	Malla	Fragmentación
Altura de primario [m]	150	150
Barro en sector antiguo[ binaria]	Sí	Sí
Fragmentación [ binaria]	Fina	Variante
Malla [m <sup>2</sup> ]	Variante	15[m]x20[m]
Vecino barro [entero]	Ninguno	Ninguno

La Figura 47 muestra el caso analizado para los diferentes tipos de mallas, donde es claro apreciar que hay una diferencia aproximada de un 10% en la probabilidad de ingreso de barro, entre la malla de mayor y la de menor tamaño. Además, si se analiza el porcentaje de extracción y la probabilidad de corte para determinar si el punto es barro (68.7%), los puntos se contaminan cercano al 100% de extracción. Esto viene dado porque los parámetros del caso ficticio consideran barro en el sector superior cuya distancia es 100% de la columna de primario, por ende este ejercicio permite validar de otra forma el modelo.

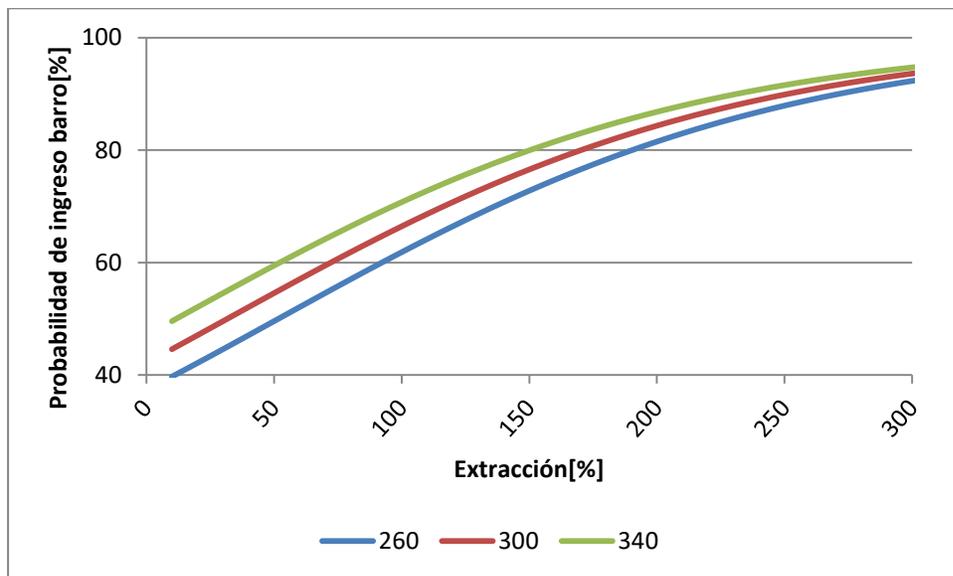


Figura 47 Probabilidad ingreso barro variando el tipo de malla.

De la misma forma a como se realizó el ejercicio para los diferentes tipos de malla, se realiza para la fragmentación, donde Figura 48 presenta la variación de la probabilidad de ingreso de barro. En este ejercicio es mucho más clara la mayor probabilidad de ingreso de barro asociada a fragmentación, con diferencias del 30%. Además, se puede validar el modelo con este ejercicio, ya que no existen vecinos con presencia de barro, por ende la fragmentación gruesa tendría una baja probabilidad de contaminarse. Esto ocurre en esta prueba, debido a que la fragmentación gruesa está siempre por debajo del porcentaje de corte.

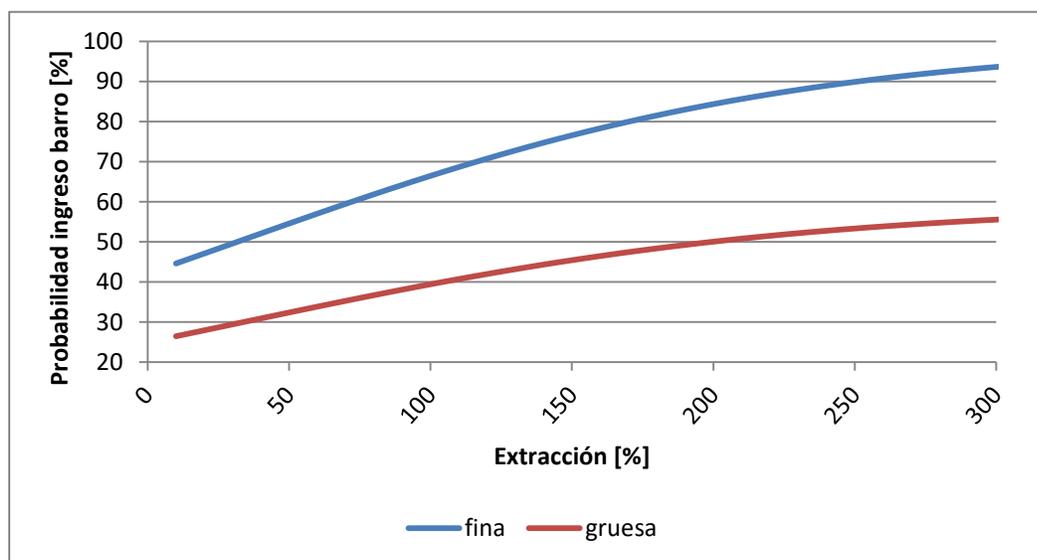


Figura 48: Probabilidad ingreso barro variando la fragmentación.

## 5.5 Análisis de resultados

La construcción de un modelo de regresión logística incluyendo las variables fragmentación y tipo de malla, permite generar un mejor ajuste de los datos. Al ser la contaminación por barro un fenómeno multivariable.

El incorporar en un modelo más variables, pero que tenga relevancia física y estadística en el fenómeno, mejorará el ajuste considerablemente, lo que se evidencia al comparar con los modelos generados por BCTEC (2018), que presentan ajustes cercanos al 50%..

Por otra parte, la validación del modelo con los datos del bloque 2 de Esmeralda y RENO sector sur, le entregan mayor robustez, haciendo que los análisis posteriores con el modelo presenten relevancia física del fenómeno.

El modelo analítico permite determinar el peso de las variables en la probabilidad del ingreso de agua barro, donde una malla de mayor tamaño aumenta en 10% la probabilidad de contaminación por barro, en comparación con una malla de menor tamaño. No obstante, el peso la fragmentación es mucho más relevante, ya que la fragmentación gruesa disminuye en un 30% la probabilidad de ingreso de agua barro.

Además, la creación de un caso ficticio para el análisis permite verificar el modelo, ya que está entregando un comportamiento esperado en base al análisis estadístico de las variables. Como ejemplo, se tiene que un punto con fragmentación gruesa si no presenta puntos vecinos contaminados, tiene una baja probabilidad de ingreso de barro.

## 6 MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJO

### 6.1 Selección del clúster

Para construir el modelo numérico se seleccionó un punto y sus seis vecinos como objeto de estudio. No obstante, para evitar problemas con las condiciones de borde del modelo de simulación, se agregara un contorno de puntos a los estudiados. Los puntos a simular se muestran en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 donde en color rojo se aprecian los puntos objeto de estudio y en azul los puntos adicionales para evitar las condiciones de borde, cabe mencionar que dichos puntos no serán analizados.

El criterio de selección de los puntos a simular se muestra en el Anexo H, donde considera la uniformidad, altura de primario, fragmentación, altura a la topografía (o canalón) y porcentaje de extracción.

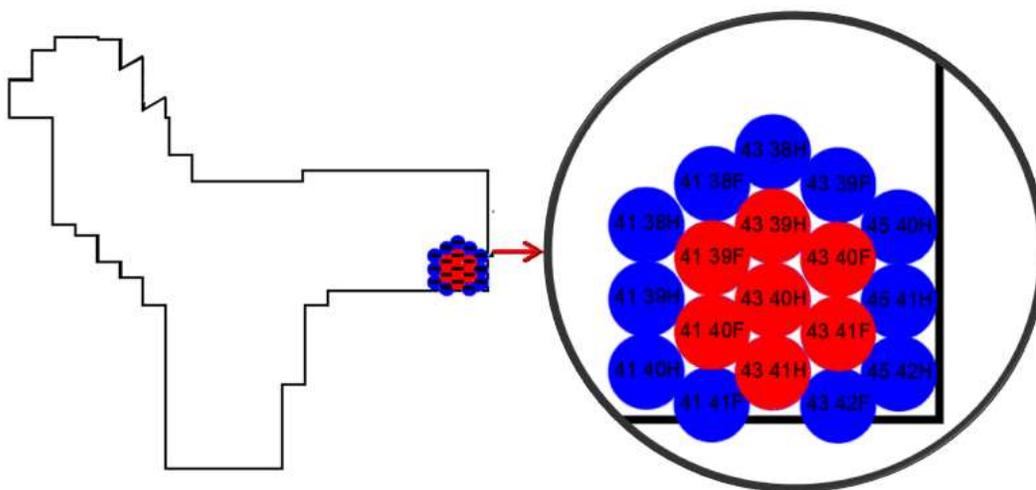


Figura 49: Puntos seleccionados malla 17[m]x20[m], Diablo Regimiento.

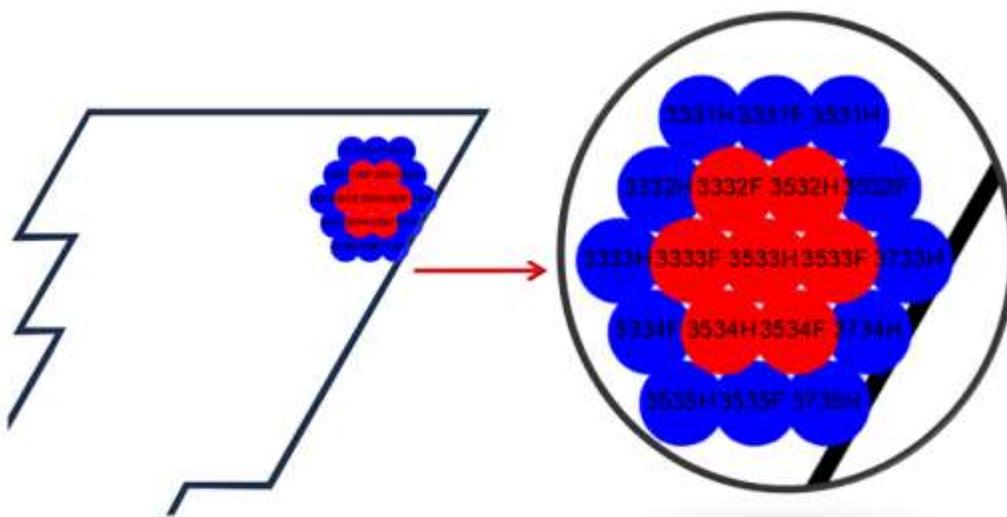


Figura 50: Puntos seleccionados malla 15[m]x20[m], Bloque 1 Esmeralda.

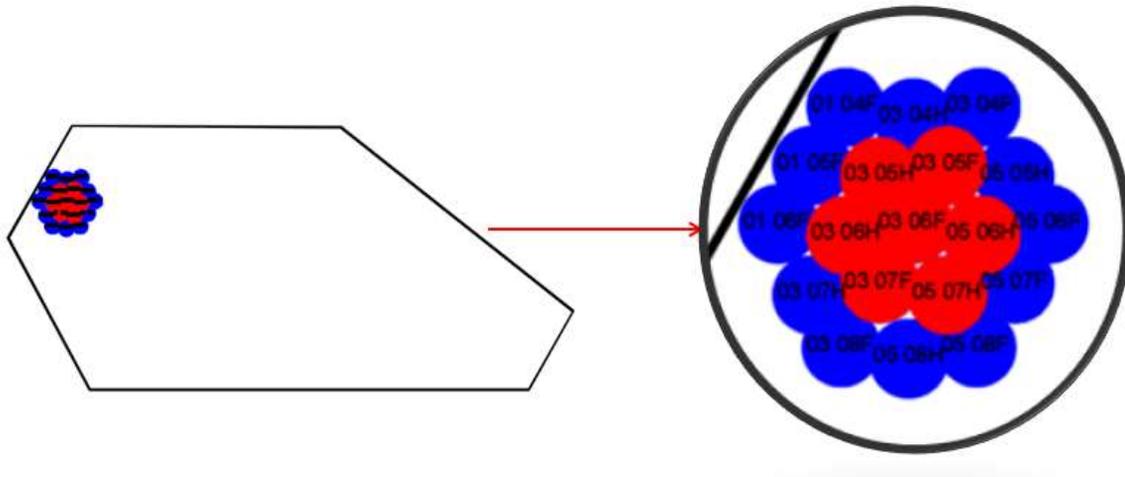


Figura 51: Puntos seleccionados malla 15[m]x17[m], Esmeralda antiguo.

## 6.2 Parámetros del modelo

El software Flowsim® considera dentro de sus inputs invariantes y principales para la simulación el modelo de bloques, las dimensiones de la bateas y la cartilla de extracción. Estos inputs se debieron generar de acuerdo a cada clúster a simular y con las condiciones y consideraciones para el barro, debido a que el software solo simula dilución que para efectos de este trabajo se considerara como barro.

### 6.2.1 Modelo de bloques

FlowSim® es un simulador de flujo gravitacional que permite simular dilución, pero sin considerar la humedad o flujo de agua. Es por este motivo, que para este estudio se tomaran las siguientes consideraciones para los modelos de bloques asociadas al barro.

- El barro estará sobre la altura de roca primaria y tendrá granulometría muy fina (RMR igual 10).
- Se considera un área de 60[m]x60[m] de barro, el cual estará ubicado sobre el primer punto contaminado por barro.
- Todos los bloques que no sean barro tendrán una granulometría superior a la del barro (RMR igual 70), esto basado en que los tres clúster seleccionados poseen tipo de rocas similares.

Por otra parte, los modelos de bloques serán un rectángulo de área basal 240[m]x 240[m] y la altura será la que exista hasta la topografía, donde los bloques que sean aire serán incorporados con densidad y RMR igual a 0.

El inicio del modelo estará bajo el nivel de producción como mínimo 50 metros.

En la Figura 52 se puede apreciar un ejemplo del modelo de bloques, que corresponde a Diablo Regimiento, donde se observan tres vistas, en color rojo se puede apreciar los bloques de barro, que se ubican por sobre el primer punto contaminado.

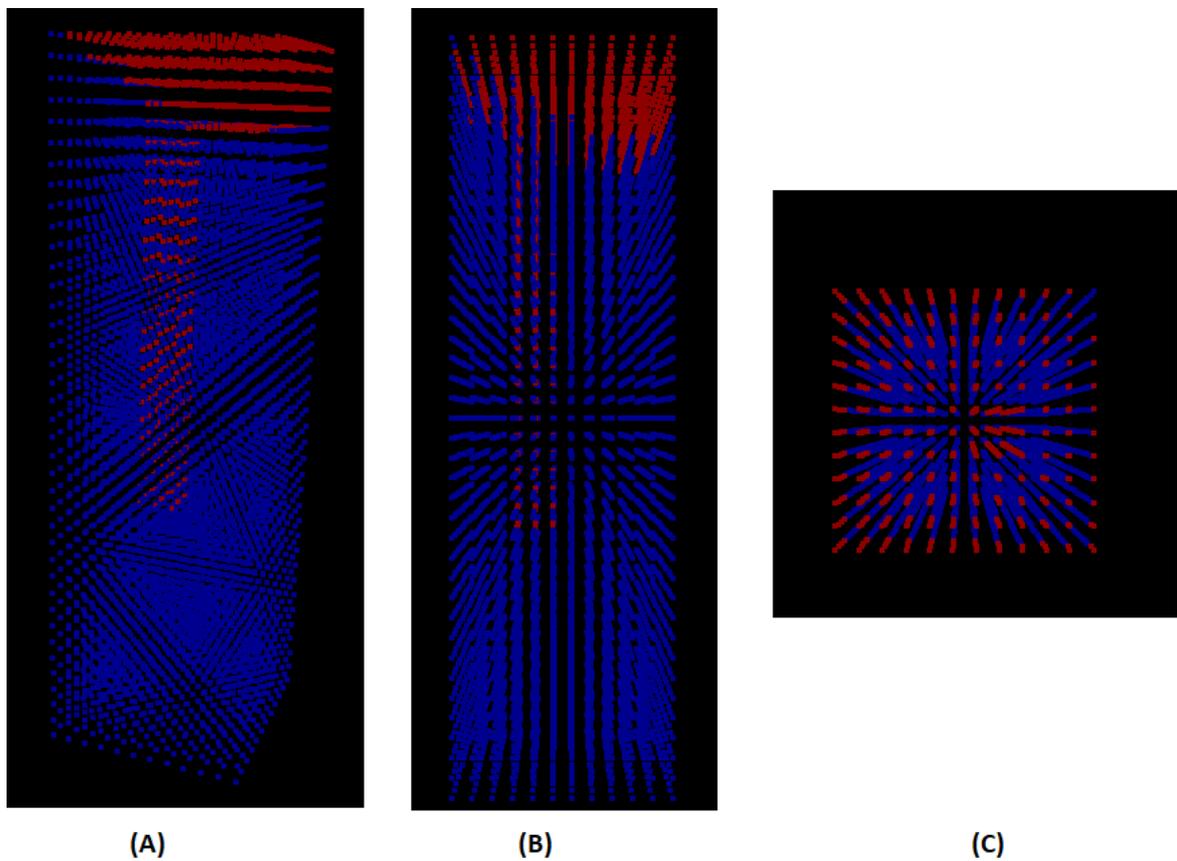


Figura 52: Modelo de bloques para la simulación. (A) vista isométrica. (B) perfil y-z, (C) vista x-y (superior). Color rojo barro, color azul mineral.

Tabla 22: Características de los modelos de bloques.

	15[m]x17[m]	15[m]x20[m]	17[m]x20[m]
Mínimo x	670	1140	720
Mínimo y	670	-100	-620
Mínimo z	2010	2120	2120
Máximo z	2690	2900	2820
Cota del Nivel de producción	2120	2210	2210

### 6.2.2 Dimensiones de la batea

Las dimensiones de la batea se extrajeron de datos y planos de DET, cuyo resumen y esquema se presentan en la Tabla 23 y Figura 53, respectivamente.

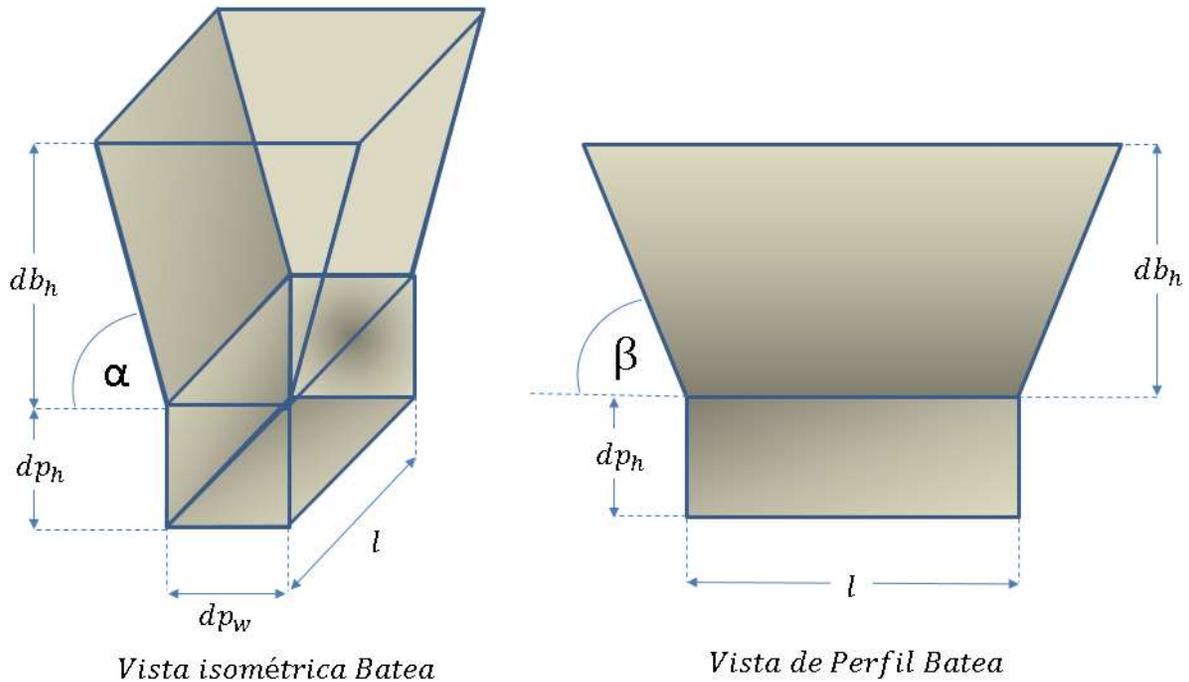


Figura 53: Parámetros de la batea.

Tabla 23: Parámetros de la batea por tipo de malla a simular.

Parámetros	15[m]x17[m]	15[m]x20[m]	17[m]x20[m]
$dp_h$	3.6	4	4.5
$dp_w$	4	4	4.5
$db_h$	11	11	13
$\alpha$	67	67	67
$\beta$	61	61	61

### 6.3 Calibración del modelo

La calibración de los modelos de flujo gravitacional se basó en el tonelaje de dilución extraído por punto de extracción, para lo cual se estableció una extracción de 2000 toneladas de dilución sobre la cual el punto es considerado barro. El modelo no pretende estimar la fecha de ingreso barro, solo busca encontrar el acierto del estado final de los puntos.

La Tabla 24 presenta los parámetros de calibración en Flowsim para cada modelo construido, cuyos resultados se muestran en la Figura 54, Figura 55 y Figura 56. El resumen de las predicción se muestran en la Tabla 25, donde se puede apreciar que el modelo de la malla 15[m]x17[m], sobre estima los puntos y el modelo de la malla 17[m]x20[m] subestima los puntos barro. Por otro lado, el modelo 15[m]x20[m] estima la cantidad correcta de puntos barro y no barro, sin embargo se equivoca en el orden de la predicción.

Tabla 24: Parámetros calibrados de FlowSim®.

Parámetros	15[m]x17[m]	15[m]x20[m]	17[m]x20[m]
N <sub>1</sub>	2	2	3
N <sub>2</sub>	3	3	4
C <sub>v</sub>	4	4	4
m	3	3	3
Discretización	2[m]x2[m]x2[m]	2[m]x2[m]x2[m]	2[m]x2[m]x2[m]

Tabla 25: Características puntos simulados.

15[m]x17[m]			15[m]x20[m]			17[m]x20[m]		
Punto	Barro	Modelo	Punto	Barro	Modelo	Punto	Barro	Modelo
03 06H	Sí	Sí	35 33H	Sí	Sí	43 40H	Sí	Sí
01 05F	Sí	Sí	33 32F	No	No	43 40F	Sí	Sí
03 05H	Sí	Sí	35 32H	No	Sí	43 41F	Sí	No
03 06F	Sí	Sí	35 33F	Sí	Sí	43 39H	Sí	Sí
03 07F	No	Sí	35 34F	Sí	Sí	41 40F	Sí	Sí
03 07H	Sí	Sí	35 34H	Sí	No	41 39F	Sí	Sí
01 06F	Sí	Sí	33 33F	Sí	Sí	43 41H	Sí	No

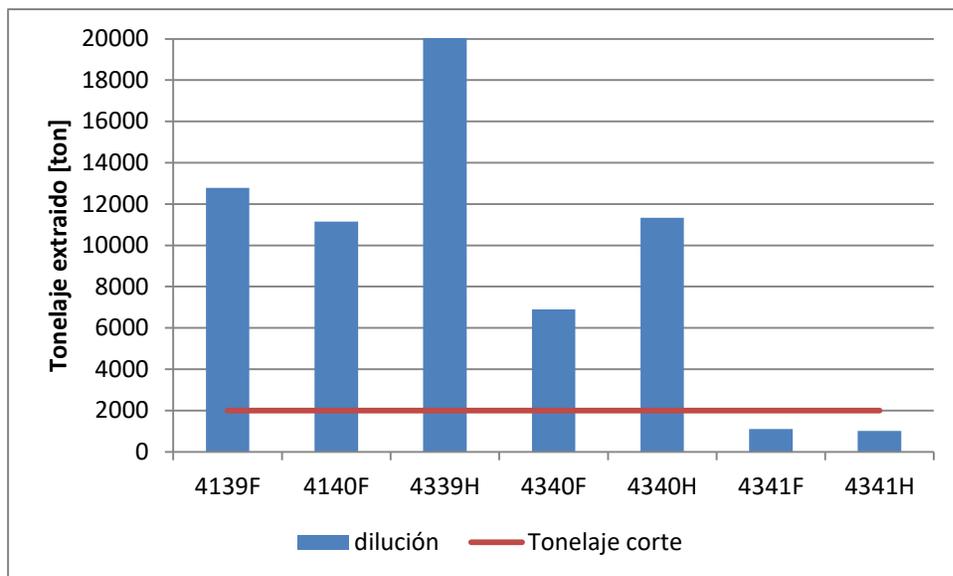


Figura 54: Tonelaje de dilución extraído malla 17[m]x20[m]

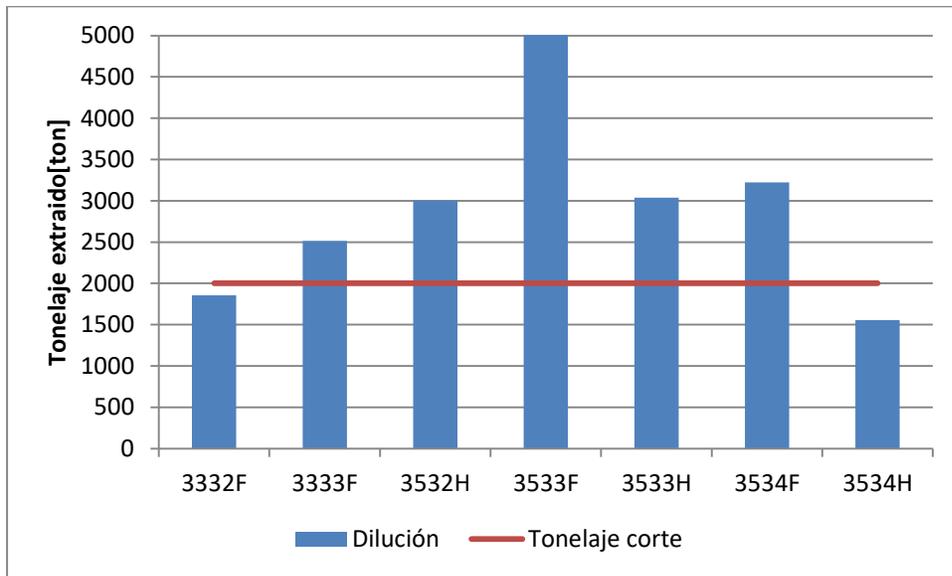


Figura 55: Tonelaje de dilución extraído malla 15[m]x20[m].

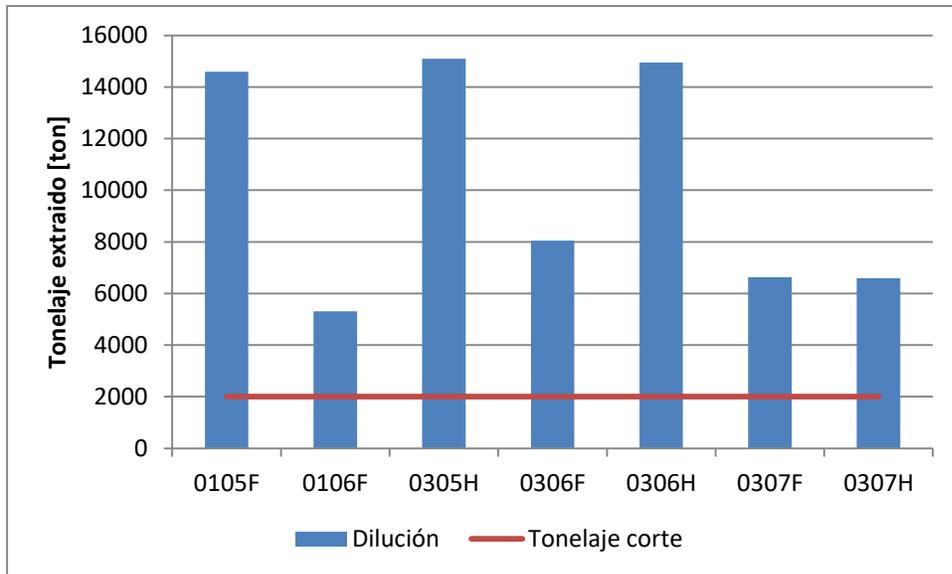


Figura 56: Tonelaje de dilución extraído malla 15[m]x17[m].

Por otra parte, si se analizan el movimiento del material en los modelos de flujo, es posible notar la interacción de los elipsoides de acuerdo a los tipos de malla (ver Figura 57). Donde la malla 15[m]x17[m] presenta buena interacción (Figura 57 (A)), en cambio, la malla 17[m]x20[m] presenta baja interacción (Figura 57 (C)). La malla 15[m]x20[m], se presenta como una mezcla de los dos extremos de mallas analizadas en este trabajo (Figura 57 (B)).

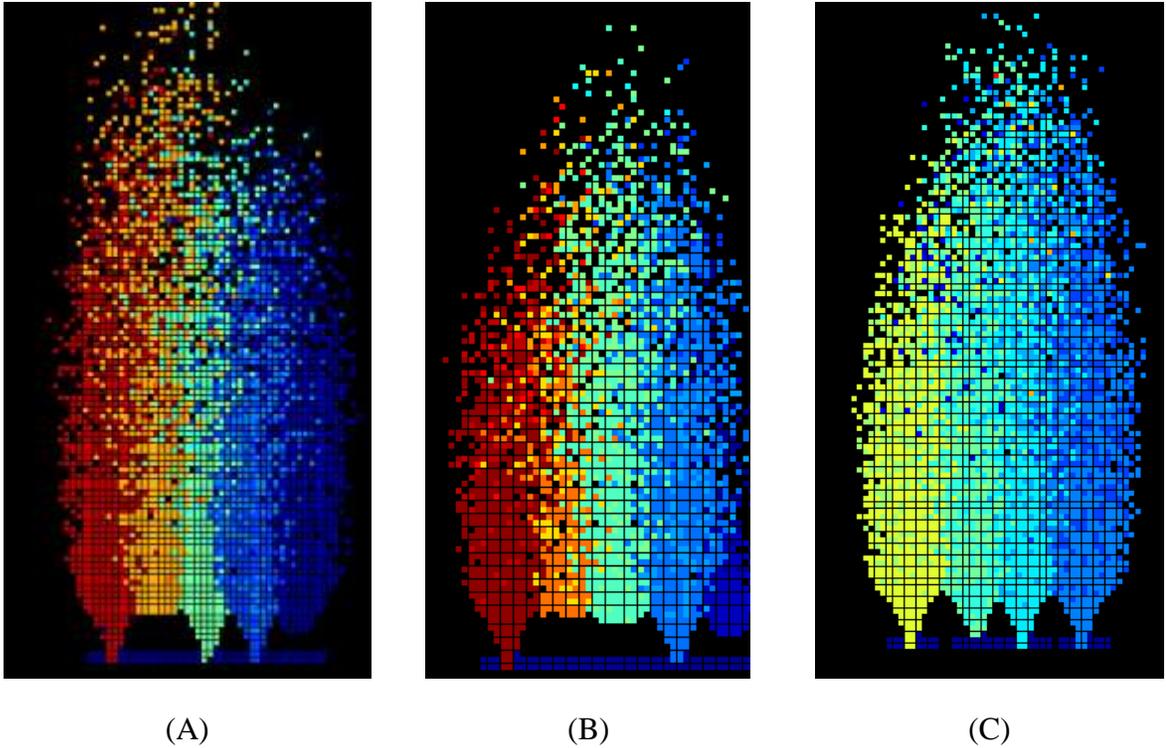


Figura 57: Interacción de los elipsoides. (A) malla 15[m]x17[m]. (B) malla 15[m]x20[m]. (C) malla 17[m]x20[m].

Si se relaciona la interacción de los elipsoides (Figura 57) con el ingreso de barro a los puntos de extracción (Figura 58), se puede apreciar que la malla de mayor tamaño el barro ingresa concentrado por unos pocos puntos, debido a la poca interacción, en cambio en mallas de menor tamaño barro baja de manera más diluida por todos los puntos de extracción.

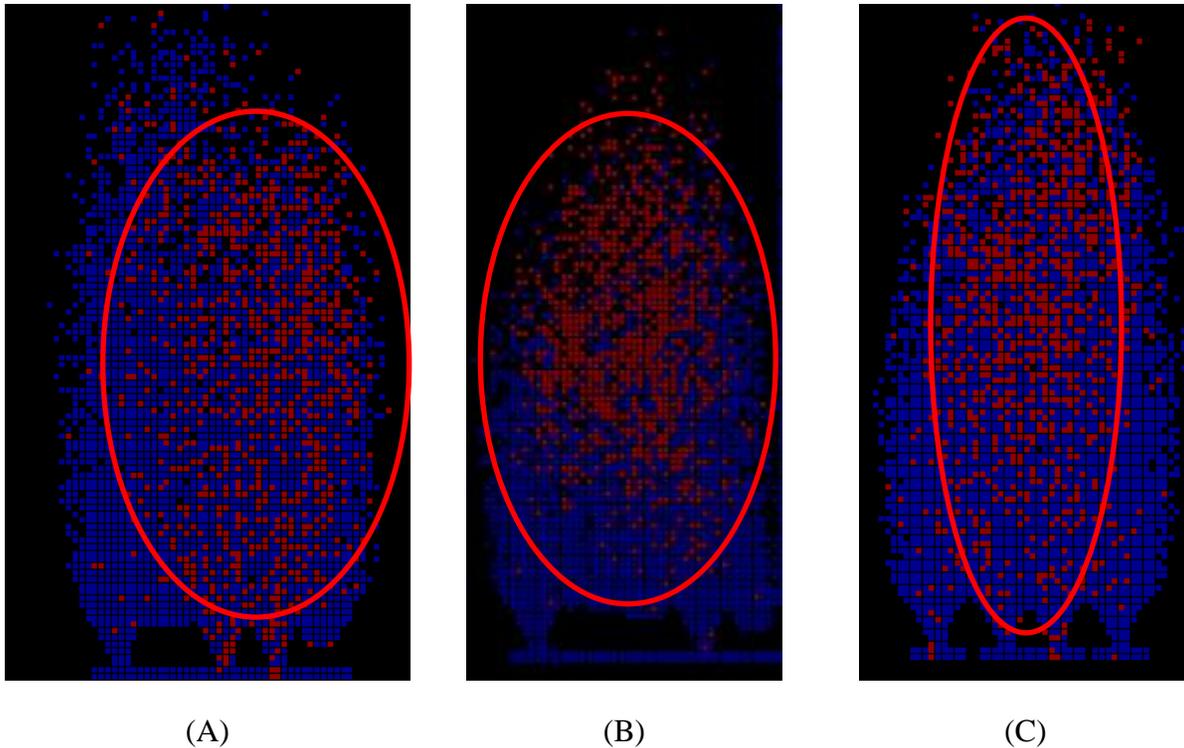


Figura 58: ingreso de dilución por tipo de malla. (A) malla 15[m]x17[m]. (B) malla 15[m]x20[m]. (C) malla 17[m]x20[m].

#### 6.4 Pruebas para puntos

Para comprobar la influencia de la malla de manera numérica, se utilizó el modelo de la malla 15[m]x20[m]. Con este modelo, se creó dos simulaciones más variando el espaciamiento de los puntos de extracción a 15[m]x17[m] y 17[m]x20[m] por un tiempo de 37 meses. Las tres simulaciones se generaron con el mismo modelo de bloques y la misma extracción, de manera de dejar variante solo el tipo de malla.

Como se puede apreciar en la Tabla 26, malla de menor tamaño incorpora menor tonelaje de dilución/barro, en cambio malla de mayor tamaño permite el ingreso de mayor dilución/barro. Sin embargo, para el modelo analizado no existe una diferencia significativa entre una malla de 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m].

Tabla 26: Pruebas para el modelo malla 15[m]x20[m], para todos los tipos de malla.

Malla	Tonelaje extraído	Tiempo	Dilución/barro	Variación porcentual
15x17	107 Kton	37 meses	1687 ton	0%
15x20	107 Kton	37 meses	3004 ton	78%
17x20	107 kton	37 meses	3253Ton	93%

#### 6.5 Análisis de resultados

El modelo numérico, generado en FlowSim®, presenta bastantes limitaciones referentes a la predicción temporal del barro al no considerar los flujos de agua y cómo estos se mueven a través

del material quebrado la columna de extracción, sin embargo entrega una aproximación bastante adecuada para comprender el fenómeno desde el punto de vista de los elipsoides de extracción.

Del modelo numérico, se logra comprobar la teoría que una malla de mayor tamaño tiene una menor interacción de los elipsoides. Esto genera una rápida conexión con la cavidad de barro en superficie y que ingrese de manera acelerada a los puntos de extracción. Sumado a lo anterior, el barro ingresa preferencialmente por una acotada área, en cambio, una malla de menor tamaño permite que el material se diluya en todos los puntos y su conexión sea más tardía que en puntos más espaciados.

Por otro lado, el análisis del caso ficticio corrobora el análisis estadístico realizado, sin embargo, no existe una diferencia muy significativa entre una malla 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m]. Debido a que para el caso presentado el elipsoide presenta un menor diámetro.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La fragmentación fina aumenta la probabilidad de ingreso de agua barro, que mediante el modelo analítico fue posible cuantificar en un 30% más por sobre una fragmentación gruesa. Esto permite deducir que el aumento de la probabilidad de ingreso de agua barro, asociado a la altura de extracción, esta también relacionado la fragmentación secundaria.

La definición de una nueva condición para la contaminación vertical y lateral permite ser un poco más específico con los análisis realizados de los puntos extracción. Ya que, para la contaminación vertical no existe una relación asociada a la uniformidad de los puntos, en cambio, si existe para la contaminación lateral, cuyo aumento en la uniformidad permite una mayor recuperación, asociada a una bajada más regular de la columna de mineral.

Siguiendo la línea de la contaminación lateral, se comprobó la existencia de una contaminación lateral en altura, cuyo origen está asociado principalmente a la secuencia de incorporación de los puntos contaminados por barro. Esto es similar a lo que propone DeWolfe(1981), con respecto a la dilución, ya que esta puede migrar lateralmente por el air gap asociado al caving del método. No obstante, el barro tiene mayor facilidad para migrar por el air gap, dado que su consistencia se asemeja más a un flujo que a un material particulado (Jakubec et al, 2013).

La malla de extracción presenta relevancia en la contaminación por barro, debido a que según la historia de DET se corrobora que mayor espaciamiento de puntos permite un ingreso temprano de la dilución. Esto se debe a la menor interacción de los elipsoides de extracción, asemejándose más a un flujo aislado cuya conexión de la altura de extracción del punto con la fuente generadora de barro se realiza de manera más temprana.

Además, el tiraje aislado asociado a mallas de mayor tamaño genera que el ingreso de barro se produzca concentrado por un sector de puntos reduciendo la migración lateral.

El caso contrario, al tener diseños de menor tamaño el ingreso de barro se ve retardado, debido a que una mayor interacción de los puntos permite que la columna de mineral/barro baje de forma más regular e interactúe con toda su vecindad de puntos, permitiendo que el barro baje por todos los puntos de la misma manera y se diluya entre todas las columnas de puntos vecinos.

Estadísticamente, el peso de la variable de la malla de extracción genera diferencia de aproximadamente 5% entre los tipos de mallas estudiados (15[m]x17[m], 15[m]x20[m] y 17[m]x20[m]).

Con la conclusión asociada a la malla, se genera la pregunta, si el “gigantismo”, ya sea de DET u otras operaciones en el mundo, asociado a la incorporación de equipos de mayor tamaño y con eso aumentos en los tamaños de los diseños, ¿ha sido la mejor decisión del punto de vista económico?

### 7.1 Recomendaciones y trabajos futuros

Se recomienda para futuros proyectos evaluar la utilización de mallas de extracción incorporando la probabilidad de ingreso de agua barro, de manera de no reducir las reservas extraíbles de los proyectos y disminuir la promesa económica de cada uno.

Utilizar el modelo analítico que relaciona la malla de extracción con las demás variables predictivas para evaluar la probabilidad de contaminación por barro de proyectos futuros. Sin embargo, es necesario revisar las condiciones del porcentaje de corte utilizado para un proyecto nuevo.

Analizar, desde el punto de vista de la malla de extracción, que ocurre con los puntos contaminados por barro, que luego de su declaración se les sigue extrayendo. Debido a que continuar con la extracción de los puntos que presentan mayor interacción, permitiría que el barro se diluyera entre todos los puntos vecinos, es decir, se filtraría por la extracción del punto y sus vecinos.

Se requiere analizar con mayor detalle la secuencia de incorporación en el ingreso de agua barro, considerando una temporalidad menor y como varía la altura de los puntos acorde a la extracción y a la secuencia. Además, de la medición del ángulo de desplome y cómo afecta la geometría del frente de incorporación.

Además, es necesario considerar dentro de los estudios futuros los caudales de agua hacia los puntos de extracción, ya que es uno de los elementos generadores de barro y la información existente es escasa o de baja confiabilidad.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Arce Pino, J. (2002).** Dimensionamiento de distancia entre puntos de extracción y niveles de producción- socavación para metodo Panel Caving En Roca Primaria Mina el Teniente. *Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil de Minas*, 210 h. Santiago, Chile: Universidad de Santiago, Facultad de Ingeniería.
- BCTEC. (2018).** *Análisis riesgo de ingreso de agua barro a proyecto Diamante*. BCTEC-DET-GPRO-INF-65375\_Revisión B.
- BCTEC. (2018b).** *Análisis riesgo de ingreso de agua barro a proyecto Andesita*. BCTEC-DET-GPRO-INF-65375\_revisión B.
- Bratvold, R., & Begg, S. (2010).** *Making Good Decisions*. Society of Petroleum.
- Butcher, R., Joughin, W., & Stacey, T. (2000).** *Methods of Combating Mudrushes in diamond and base Metal Mines*. The Safety in mines Research Advisory Committe (SIMRAC).
- Butcher, R., Stacey, T., & Joughin, W. (2005).** *Mud rushes and methods of combating them*. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Call & Nicholas, Inc; PT Freeport McMoran Copper and Gold Co.; Hydrology consultants Inc. (1998).** IOZ Wet Muck Study. PT Freeport Internal Report.
- Castro , R., & Whiten, W. (2007).** A new cellular automaton to model gravity flow in block caving on physical modelling observations.
- Castro, R. (2006).** Study of the mechanism of gravity flow for block caving. *Tesis de Doctorado*. Brisbane, Australia: University of Queensland.
- Cavieres, P., Contreras, E., & Arce, J. (2002).** Dimensionamiento de mallas de extracción, bateas recolectoras y pilar corona para metodo panel caving en roca primaria, Mina El Teniente.
- CODELCO. (2010).** Definición de matriz de criticidad para el control de agua-barro. *SGP-DET*.
- CODELCO. (31 de Enero de 2018).** Informe del Proceso de Planificación Anual. (E. Teniente, Ed.) Rancagua, Chile.
- CODELCO. (2018b).** Overview El Teniente 2018. Rancagua.
- DET-CODELCO. (2018).** Overview El Teniente 2018. Rancagua.
- Fuentes, M. (2015).** Calibración y desarrollo de FlowSim mediante la utilización de trazadores inteligentes. *Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

- González Aguilar, F. R. (2008).** Metodología para diseño de mallas de extracción incorporando autómatas celulares. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- González Iturriaga, R. (2014).** Desarrollo de Flowsim 3.0: Simulador de flujo gravitacional para la minería de Block/Panel Caving. *Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas*, 79 h. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Harrison, D. (2009).** Caracterización estructural bajo el nivel Teniente 8, mediante el análisis de sondajes ortogonales orientados, para el proyecto nuevo nivel mina, Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. Concepción: Universidad de Concepción.
- Hosmer, D., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. (2013).** Applied logistic regression. *John Wiley & Sons*.
- Hubert, G; Dirdjosuwondo, S; Plaisance, R; Thomas, L.; (2000).** Tele-Operation at Freeport to Reduce Wet Muck Hazard. En *MassMin*.
- Itasca. (2007).** A rapid gravity flow simulator. (*Chapter 7*). Proceeding of international Caving Study.
- Jakubec, J., Clayton, R., & Guest, A. (2013).** Mudrush Risk Evaluation.
- Kvapil, R. (1965).** Gravity flow of granular materials in hoppers and bins.
- Kvapil, R. (2004).** Gravity flow in sublevel caving and panel caving - a common sense approach.
- Montecino Bastías, N. (2011).** Modelo de mezcla de fragmentación secundaria en minería de block/panel caving. *Tesis para optar al grado de magister de minería*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Navia Moreno, I. (2014).** Análisis del ingreso de agua-barro al sector Diablo Regimiento, División El Teniente, Codelco. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas*, 152 h. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Paredes Morales, P. (2012).** Mecanismo de entrada de dilución en minas de Block/Panel Caving. *Tesis para optar al grado de magister en minería*, 174 h. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Pérez Lara, Á. (2017).** Cuantificación del ingreso de agua-barro en el Teniente. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas*, 109 h. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Pierce, M. (2009).** A Model for gravity flow in block caving mines. *PhD. Thesis*. Australia: University of Queensland.

- Rojas Atao, J. A. (2017).** Estudio de Flowsim como una herramienta de simulación de flujo gravitacional. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas, Universidad de Chile.
- Samosir, E., Basuni, J., Widijanto, E., & Syaifullah. (2008).** *The Management of Wet Muck at PT Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine*. 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining.
- Susaeta, A. (2004).** *Theory of gravity flow (Part 2)*. Santiago: Massmin.
- Susaeta, A., & Diaz, H. (s.f.).** Estado del Arte del Modelamiento del Flujo Gravitacional en Minería por Hundimiento por Bloques. *55(255)*, 17-26.
- Valencia Vera, M. E. (2013).** Desarrollo e implementación de Flowsim para su aplicación en la minería de block/panel caving. *Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Vargas Vergara, R. (2010).** Metodología de diseño de malla de extracción en BLock y Panel Caving incorporando back-análisis. *Tesis para optar al grado de magister en minería*, 152. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Zeng, L., & King, G. (2001).** Logistic regression in rare events data. *Political analysis*, 137-163.

## Anexo A ALTURA DE ROCA INSITU

Como se puede apreciar en las Figura 59 y Figura 60, se observa el mismo comportamiento para altura Insitu y la altura de primario, mostrada en la sección 3.1, ya que los puntos con alturas Insitu menores son los que se contaminan antes con barro.

Por otra parte, y sin contar el bloque 1 que ambas alturas son iguales, las figuras permiten apreciar que las diferencias entre las alturas de roca primaria e insitu, en la gran mayoría de los datos no supera los 40 metros, sin embargo, existen puntos donde estas diferencias son mucho mayores, ya que analizando la Tabla 27, las medidas que cambian son los máximos (por sobre los 200 metros) y promedios, pero mínimo y mediana permanecen constante para ambos casos.

Si se observa la Figura 59, las alturas insitu de mayor tamaño se producen más hacia el Este. Más hacia ese sector no se presentan sectores productivos en cotas superiores, sumado al hecho que se esta en las zonas de más alta montaña.

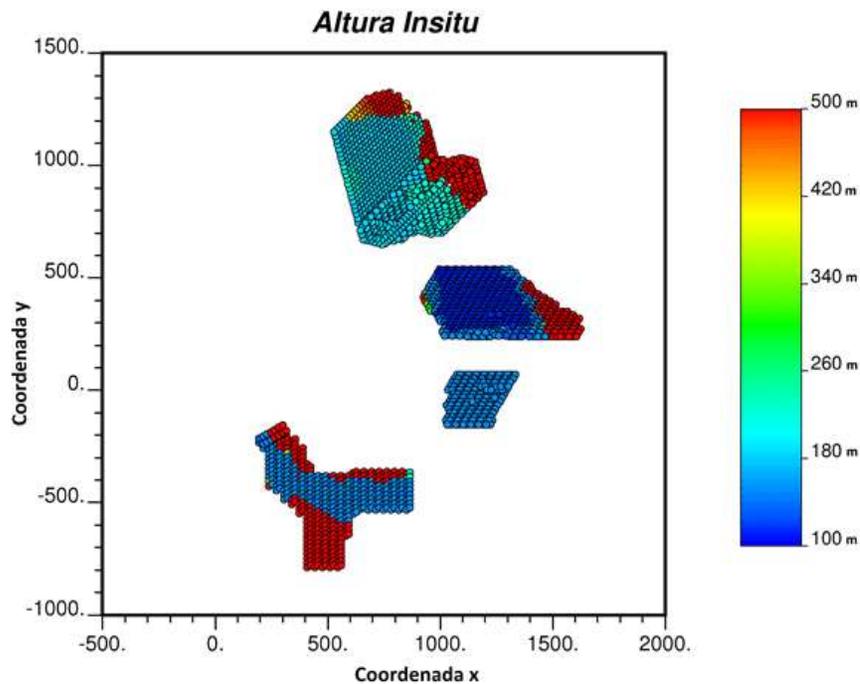
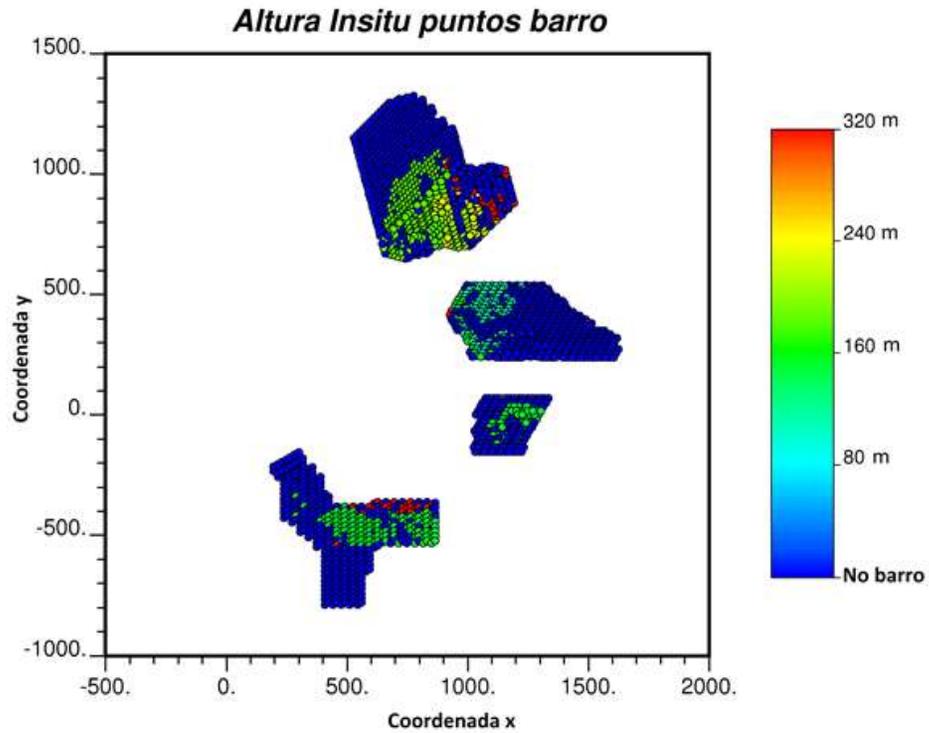


Figura 59: Distribución alturas de roca Insitu de sectores en estudio.



**Figura 60: Distribución alturas de roca Insitu de puntos contaminados.**

**Tabla 27: estadísticas básicas de la altura de roca primaria puntos contaminados por barro.**

Sector	ES antiguo	RENO Sur	RENO Norte	Bloque 1	DR
Dimensiones[m x m]	15x17	15x17	15x20	15x20	17x20
Mínimo	109	180	180	149	130
Mediana	149	220	180	149	150
Máximo	889	740	660	149	750
Curtosis	1.6	-1.7	0.9	-	-1.8
Asimetría	1.9	0.5	1.6	-	0.4
Promedio	229.5	394.1	255.5	149.0	348.6
Coefficiente de Variación	280.3	141.4	82.8	0.0	153.9

## Anexo B FRAGMENTACIÓN SECTORES

La Figura 61, muestra todos los puntos considerados en el estudio. De estos puntos, se puede apreciar que la fragmentación más gruesa está más cercana a la parte central de todos los sectores, donde está ubicada la pipa Braden y a medida que uno se aleja de este sector la fragmentación es más fina.

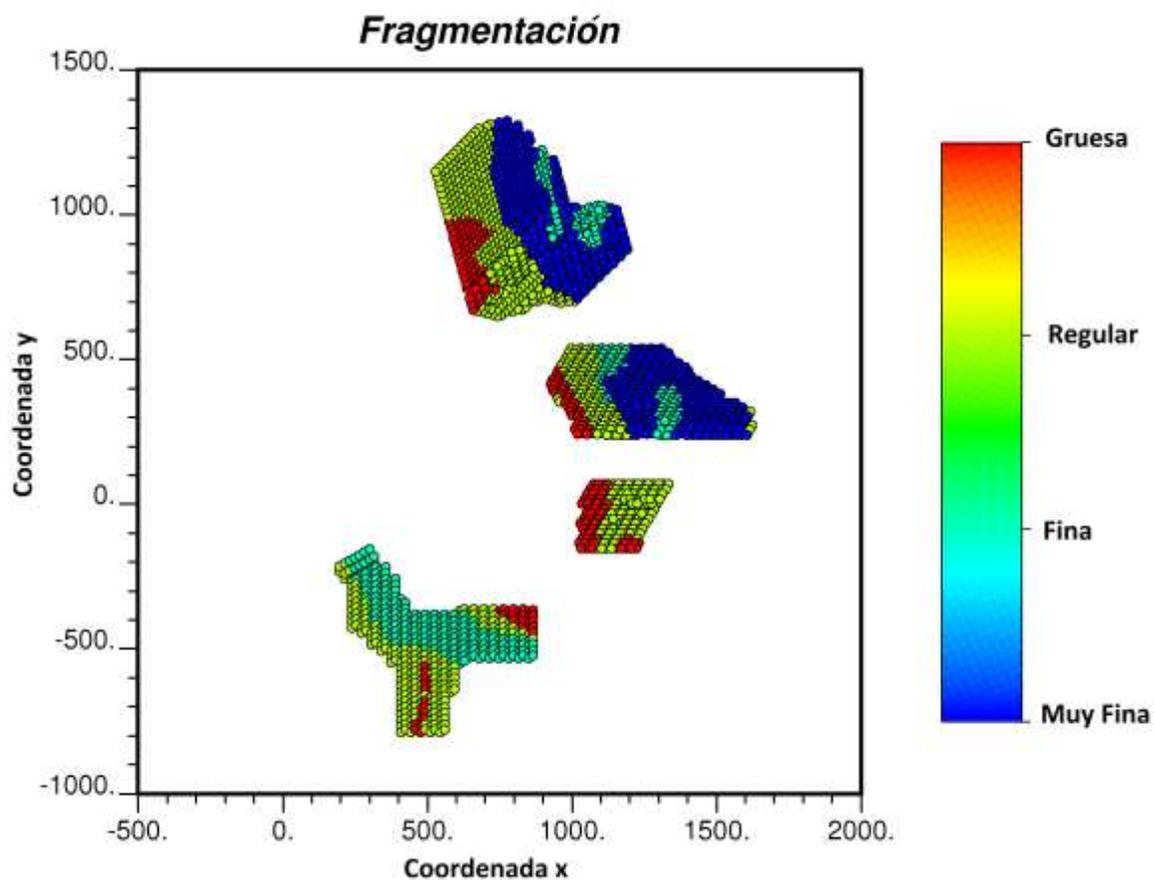


Figura 61: Fragmentación sectores en estudio.

## Anexo C CONTAMINACIÓN VERTICAL

Al igual como se pudo apreciar en la sección 3.5.1, la contaminación vertical del resto de sectores estudiados presenta un comportamiento totalmente aleatorio, con respecto a la uniformidad. Este se logra apreciar en la Figura 62, y Figura 64, donde no es posible atribuir una asociación entre la uniformidad y el porcentaje de extracción.

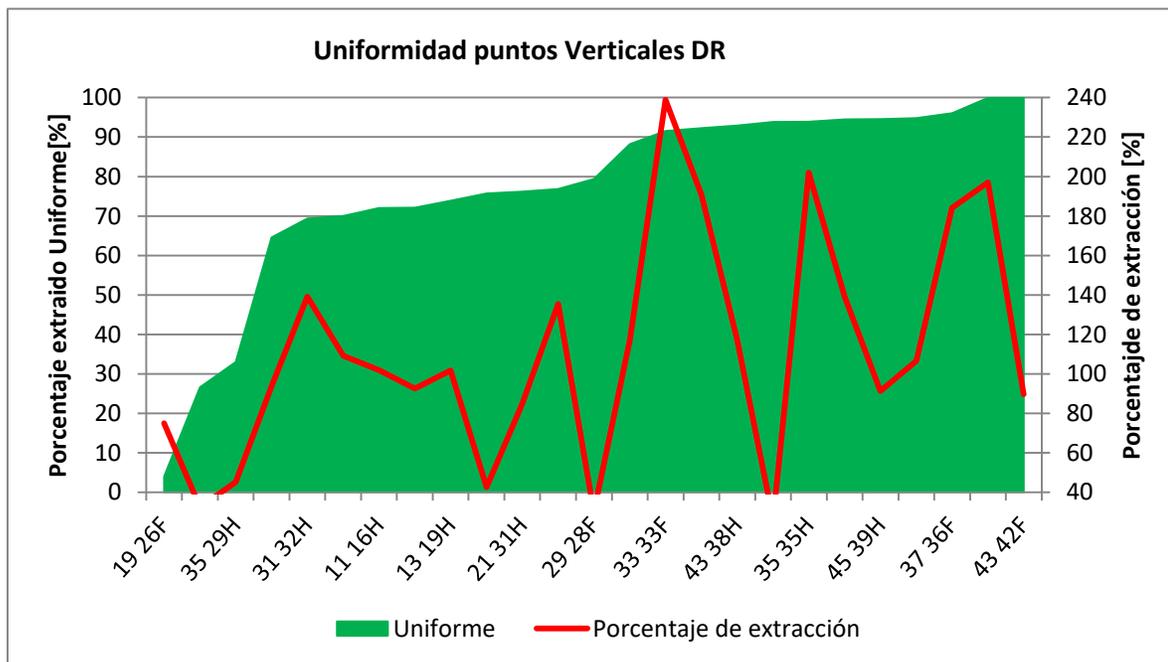


Figura 62: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, DR.

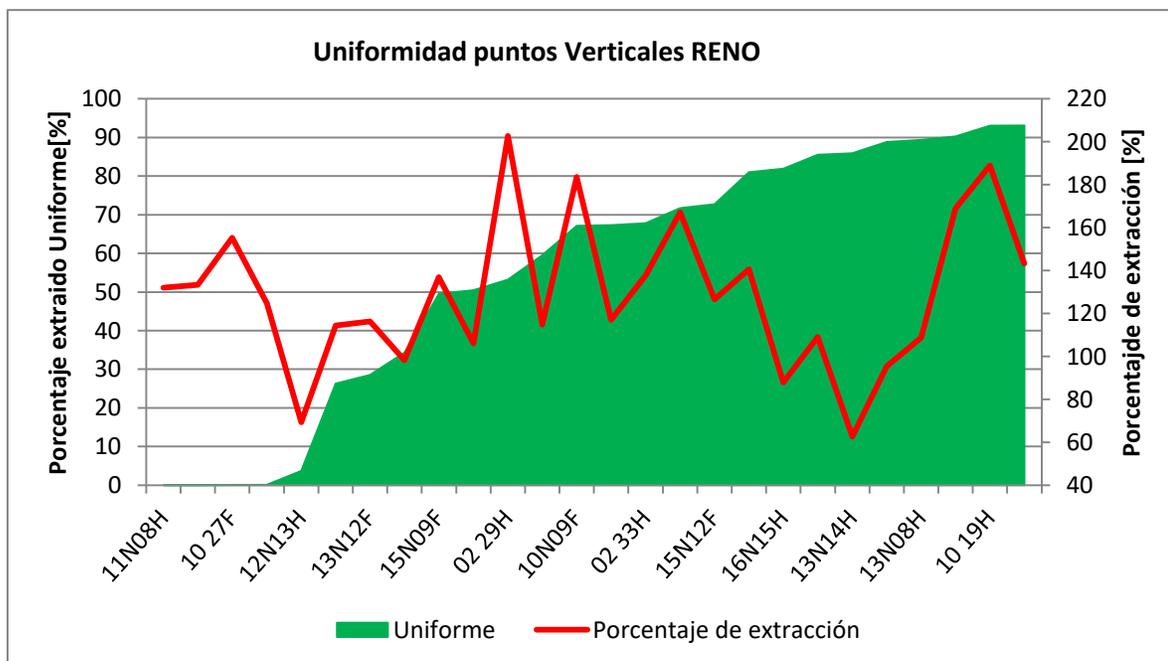
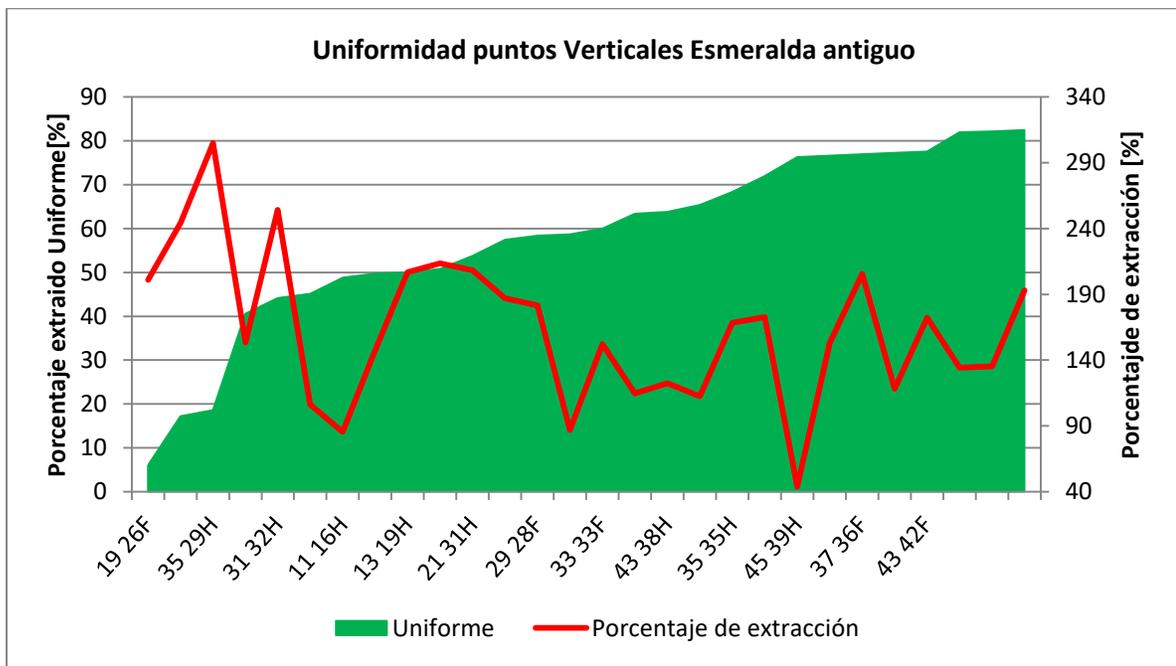


Figura 63: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, RENO.



**Figura 64: Uniformidad puntos contaminados verticalmente, Esmeralda antiguo.**

## Anexo D CONTAMINACIÓN LATERAL

La contaminación lateral asociada a la uniformidad, para el resto de sectores no es tan evidente como en el bloque 1 de Esmeralda. Ya que si se observa la Figura 65 y Figura 66, se logra apreciar un aumento en el porcentaje de extracción en los tramos bajo el 60% de uniformidad. Sin embargo, para uniformidades mayores el porcentaje de extracción se mantiene constante cerca del 140% del porcentaje de extracción.

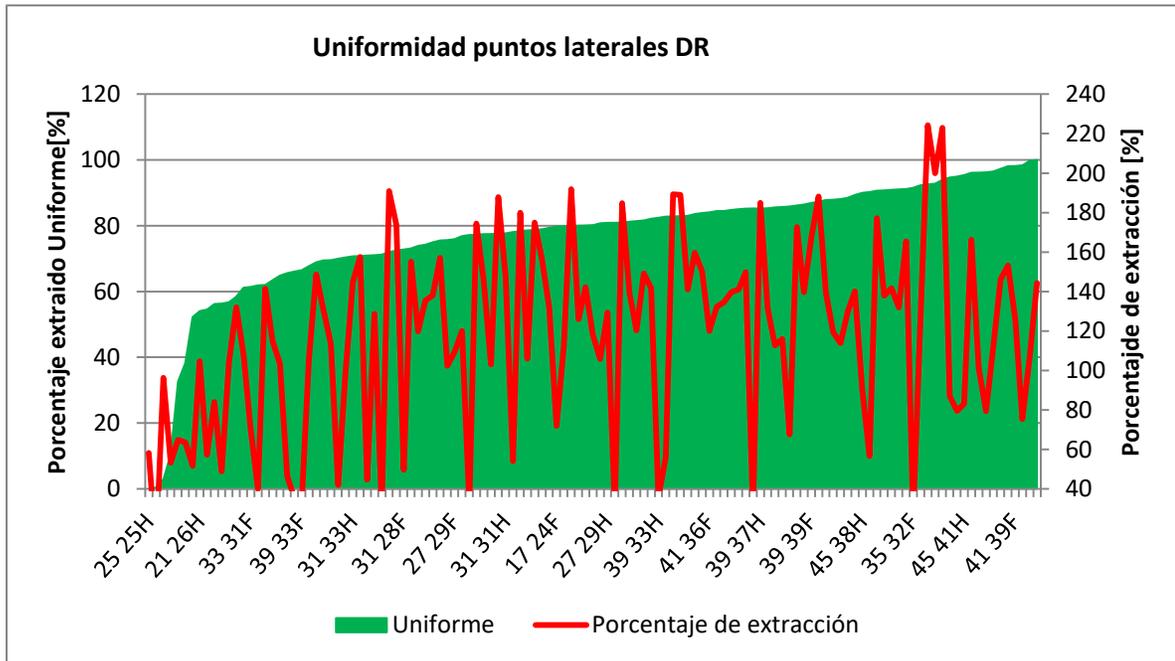


Figura 65: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, DR.

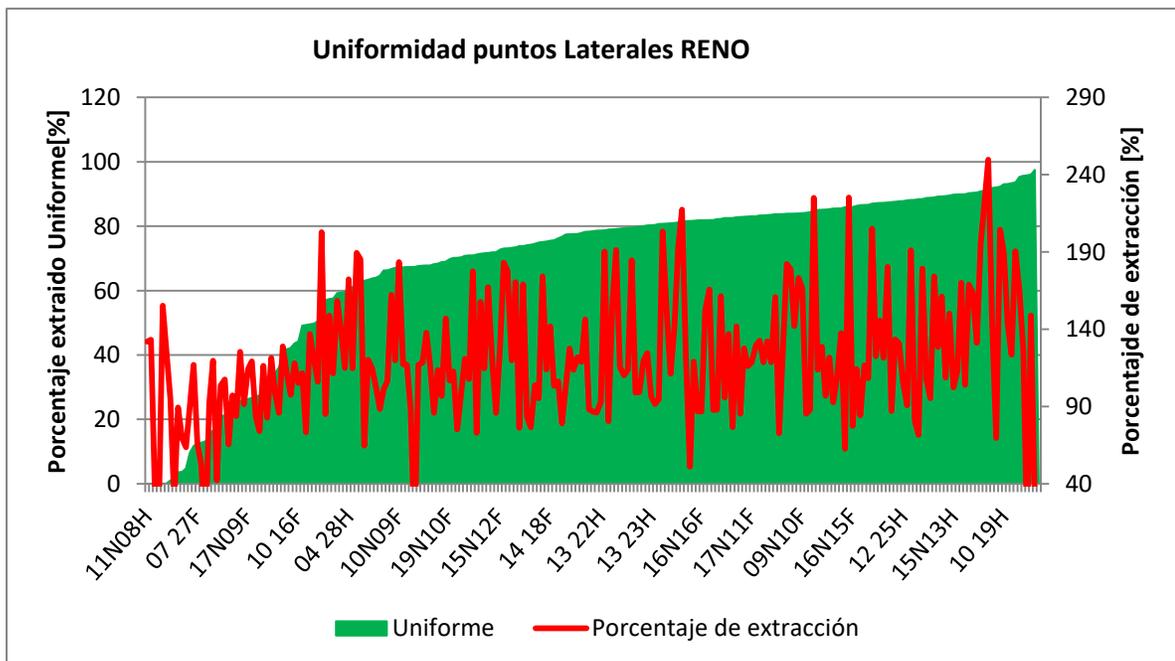


Figura 66: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, Diablo Regimiento.

Por otra parte, el sector de Esmeralda antiguo presenta una tendencia clara, de la misma forma que el bloque 1, donde a mayor uniformidad mayor es el porcentaje de extracción al cual el punto fue declarado barro, como se aprecia en la Figura 67.

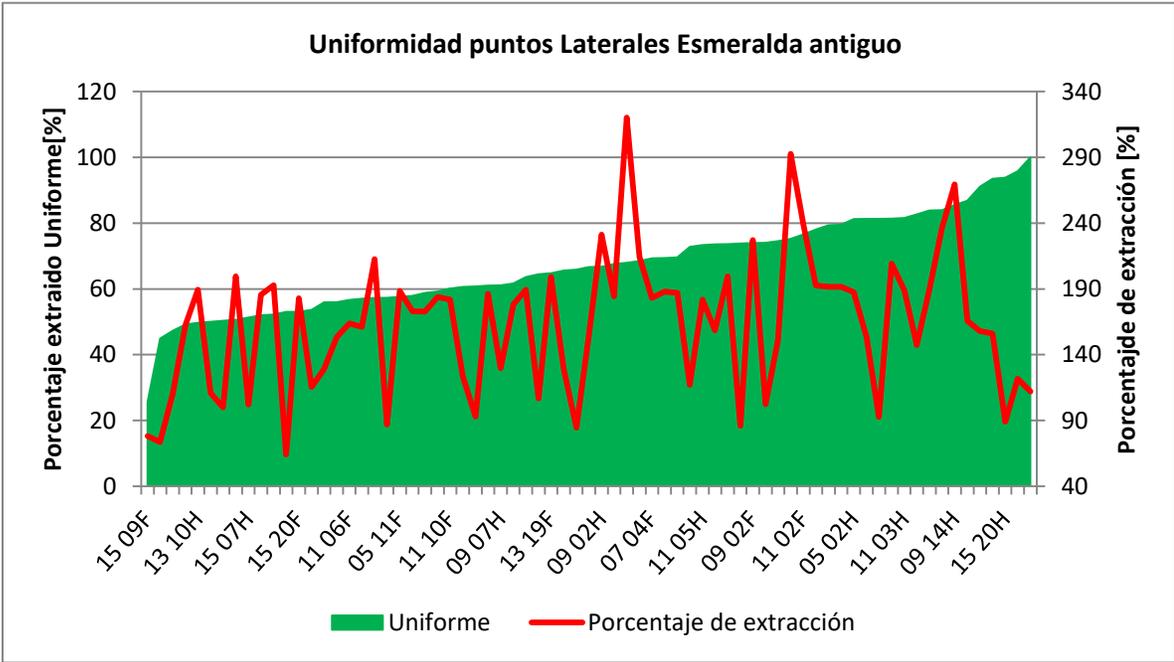


Figura 67: Uniformidad puntos contaminados lateralmente, Esmeralda antiguo.

Anexo E PUNTOS BAJO BARRO

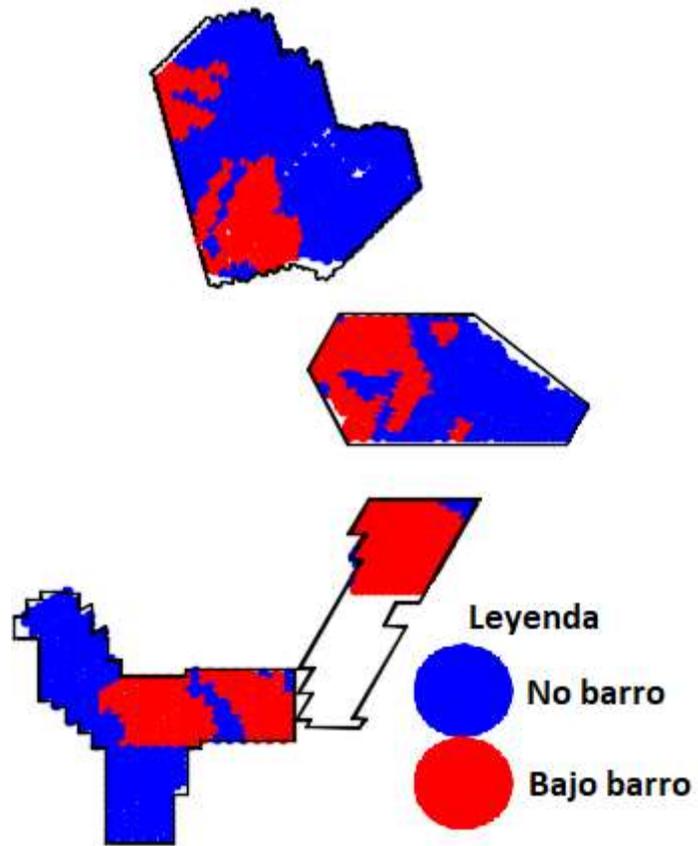


Figura 68: distribución de los puntos que estan bajo barro.

## Anexo F MATRIZ DE CORRELACIÓN

Para esta sección se deben considerar las siguientes abreviaciones.

P : Altura de roca primaria.

I : Altura de roca Insitu.

T : Altura a la topografía.

F : Fragmentación.

BSA : Barro sector antiguo.

VB : Vecinos barro.

E : Extracción

M : Malla de extracción.

Como se puede apreciar en la Tabla 28, las únicas variables que presentan una correlación alta son la altura de primario e altura Insitu, esto se debe principalmente a las profundidades que se encuentran los sectores estudiados estas variables son muy similares y en algunos casos iguales, lo que para este estudio ya ha sido considerado.

Tabla 28: Matriz de correlación todos los datos utilizados.

	P	I	T	F	BSA	VB	E	M
P	1.00	0.92	0.49	-0.12	-0.26	-0.20	-0.43	0.13
I	0.92	1.00	0.46	-0.16	-0.30	-0.25	-0.46	0.08
T	0.49	0.46	1.00	-0.36	-0.18	-0.19	0.14	-0.29
F	-0.12	-0.16	-0.36	1.00	0.09	0.08	-0.11	0.33
BSA	-0.26	-0.30	-0.18	0.09	1.00	0.43	0.18	-0.13
VB	-0.20	-0.25	-0.19	0.08	0.43	1.00	0.16	-0.03
E	-0.43	-0.46	0.14	-0.11	0.18	0.16	1.00	-0.24
M	0.13	0.08	-0.29	0.33	-0.13	-0.03	-0.24	1.00

Tabla 29: Matriz de correlación, datos barro de Diablo Regimiento.

	P	I	T	F	BSA	VB	E	M
P	1.00	0.94	0.69	0.40	-0.30	-0.30	-0.71	0.01
I	0.94	1.00	0.78	0.43	-0.38	-0.40	-0.76	0.03
T	0.69	0.78	1.00	0.46	-0.34	-0.35	-0.54	0.16
F	0.40	0.43	0.46	1.00	-0.19	-0.17	-0.39	0.11
BSA	-0.30	-0.38	-0.34	-0.19	1.00	0.40	0.40	0.04
VB	-0.30	-0.40	-0.35	-0.17	0.40	1.00	0.47	0.07
E	-0.71	-0.76	-0.54	-0.39	0.40	0.47	1.00	0.13
M	0.01	0.03	0.16	0.11	0.04	0.07	0.13	1.00

Ahora bien, si se analiza con un poco más de detalle la correlación de variables, por sector y solo considerando los puntos contaminados por barro, ocurre el mismo comportamiento, como se aprecia en la Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32.

**Tabla 30: Matriz de correlación, datos barro bloque 1 Esmeralda.**

	P	I	T	F	BSA	VB	E	M
P	1.00	1.00	-0.02	0.05	-0.12	0.00	0.02	-0.08
I	1.00	1.00	-0.02	0.05	-0.12	0.00	0.02	-0.08
T	-0.02	-0.02	1.00	0.73	-0.33	-0.44	-0.06	0.08
F	0.05	0.05	0.73	1.00	-0.33	-0.43	-0.08	0.18
BSA	-0.12	-0.12	-0.33	-0.33	1.00	0.19	-0.08	-0.17
VB	0.00	0.00	-0.44	-0.43	0.19	1.00	-0.03	-0.20
E	0.02	0.02	-0.06	-0.08	-0.08	-0.03	1.00	-0.28
M	0.13	0.08	-0.29	0.33	-0.13	-0.03	-0.24	1.00

**Tabla 31: Matriz de correlación, datos barro de Reservas Norte.**

	P	I	T	F	BSA	VB	E	M
P	1.00	0.75	0.52	-0.28	-0.16	-0.17	-0.17	-0.08
I	0.75	1.00	0.44	-0.31	-0.24	-0.24	-0.39	-0.09
T	0.52	0.44	1.00	-0.75	0.08	0.09	0.44	-0.05
F	-0.28	-0.31	-0.75	1.00	0.00	-0.02	-0.29	0.14
BSA	-0.16	-0.24	0.08	0.00	1.00	0.54	0.48	0.03
VB	-0.17	-0.24	0.09	-0.02	0.54	1.00	0.49	0.04
E	-0.17	-0.39	0.44	-0.29	0.48	0.49	1.00	0.09
M	0.13	0.08	-0.29	0.33	-0.13	-0.03	-0.24	1.00

**Tabla 32: Matriz de correlación, datos barro de Esmeralda antiguo.**

	P	I	T	F	BSA	VB	E	M
P	1.00	0.92	0.78	-0.23	-0.58	-0.55	-0.57	0.10
I	0.92	1.00	0.76	-0.20	-0.53	-0.49	-0.54	0.09
T	0.78	0.76	1.00	-0.58	-0.50	-0.42	-0.42	0.13
F	-0.23	-0.20	-0.58	1.00	0.25	0.13	0.24	-0.01
BSA	-0.58	-0.53	-0.50	0.25	1.00	0.23	0.45	-0.08
VB	-0.55	-0.49	-0.42	0.13	0.23	1.00	0.46	0.06
E	-0.57	-0.54	-0.42	0.24	0.45	0.46	1.00	-0.10
M	0.13	0.08	-0.29	0.33	-0.13	-0.03	-0.24	1.00

## **Anexo G      ADICIÓN DE VARIABLES CON POCA SIGNIFICANCIA**

**Tabla 33: Variación de parámetros, con la incorporación de la malla y fragmentación.**

	<b>Modelo</b>	<b>Frag.</b>	<b>Malla</b>	<b>Variación Frag.</b>	<b>Variación Malla</b>
<b>Altura primario</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>Altura topografía</b>	-0.004	-0.005	-0.004	0.131	-0.050
<b>Extracción</b>	0.031	0.027	0.032	-0.130	0.017
<b>Vecinos barro</b>	0.398	0.381	0.395	-0.043	-0.008
<b>Barro sector antiguo</b>	-1.423	-1.641	-1.427	0.153	0.002

## Anexo H SELECCIÓN DE CLÚSTER PARA SIMULACIÓN

Para seleccionar los puntos necesarios a simular se definieron los siguientes criterios, basados en los análisis realizados en la sección 3.

- Alturas de primarios similares, diferencias de 20 metros como máximo.
- Altura a la topografía similar para el clúster, para no generar una zona de acumulación.
- El 90% del tonelaje extraído por el punto, debe ser de manera uniforme o semiuniforme.
- Las alturas extraídas de los puntos y sus vecinos, deben bajar todas similares o la gran mayoría (4 puntos), hasta los 100 metros (70% de extracción).
- La fragmentación de los puntos de ser regular, fina o muy fina.

**Tabla 34: Características puntos a simular Esmeralda antiguo.**

<b>código</b>	<b>Altura primario</b>	<b>Altura topografía</b>	<b>Barro</b>
<b>03 06H</b>	149	569	1
<b>01 05F</b>	149	569	1
<b>03 05H</b>	149	569	1
<b>03 06F</b>	149	569	1
<b>03 07F</b>	149	589	0
<b>03 07H</b>	149	589	1
<b>01 06F</b>	149	569	1

**Tabla 35: Características puntos a simular Esmeralda bloque 1.**

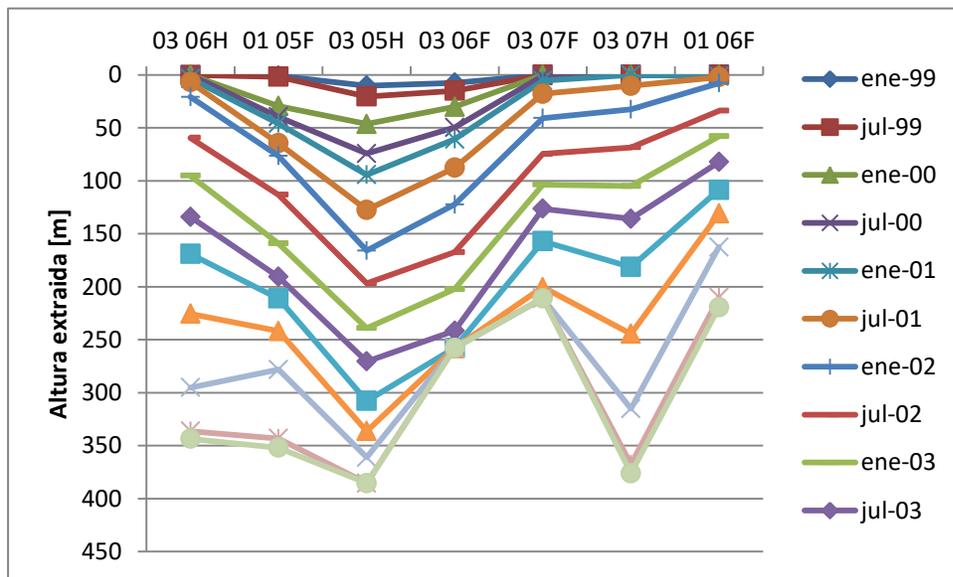
<b>código</b>	<b>Altura primario</b>	<b>Altura topografía</b>	<b>Barro</b>
<b>35 33H</b>	149	629	1
<b>33 32F</b>	149	629	0
<b>35 32H</b>	149	649	0
<b>35 33F</b>	149	649	1
<b>35 34F</b>	149	629	1
<b>35 34H</b>	149	629	1
<b>33 33F</b>	149	629	1

**Tabla 36: Características puntos a simular Diablo Regimiento.**

código	Altura primario	Altura topografía	Barro
43 40H	150	550	1
43 40F	150	550	1
43 41F	150	550	1
43 39H	150	530	1
41 40F	150	550	1
41 39F	150	530	1
43 41H	150	550	1

**Tabla 37: Características puntos a simular Esmeralda antiguo.**

código	Altura primario	Altura topografía	Barro
03 06H	149	569	1
01 05F	149	569	1
03 05H	149	569	1
03 06F	149	569	1
03 07F	149	589	0
03 07H	149	589	1
01 06F	149	569	1



**Figura 69: Alturas extraídas puntos a simular Esmeralda antiguo.**

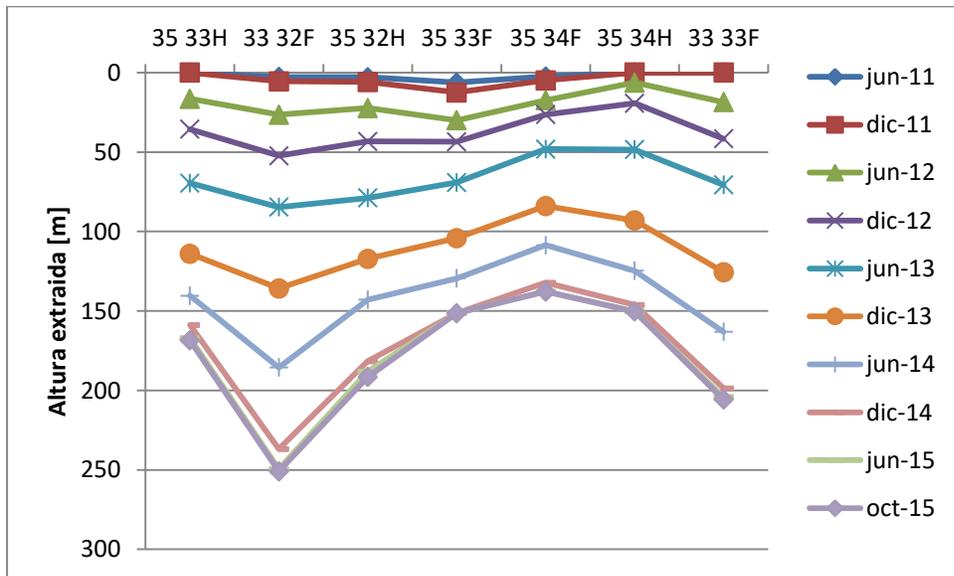


Figura 70: Alturas extraídas puntos a simular Esmeralda bloque 1.

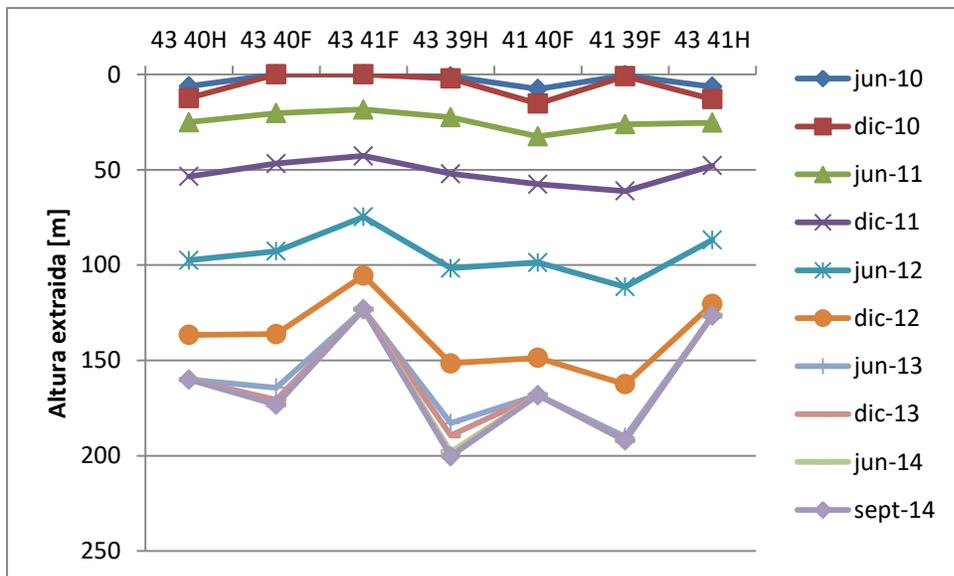


Figura 71: Alturas extraídas puntos a simular Diablo Regimiento.

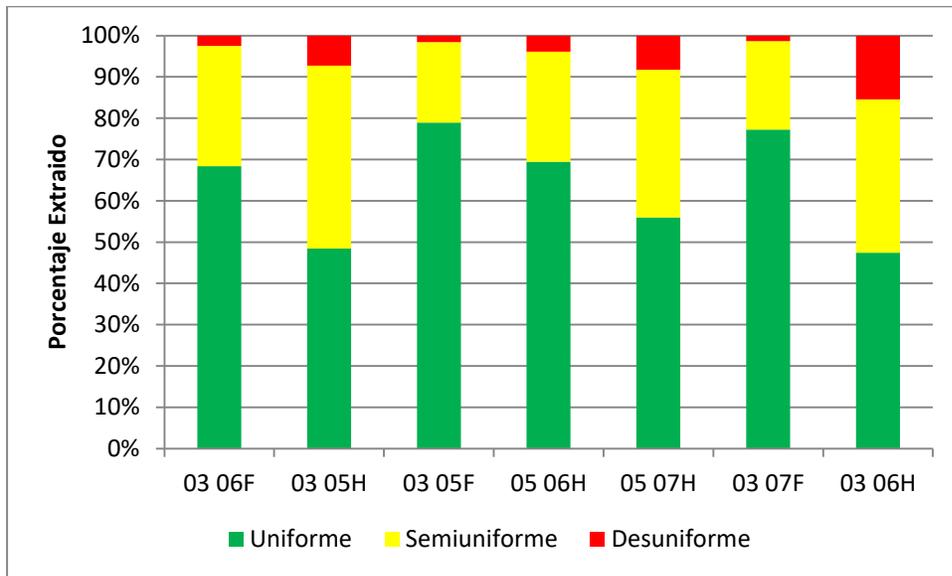


Figura 72: Uniformidad puntos a simular Esmeralda antiguo.

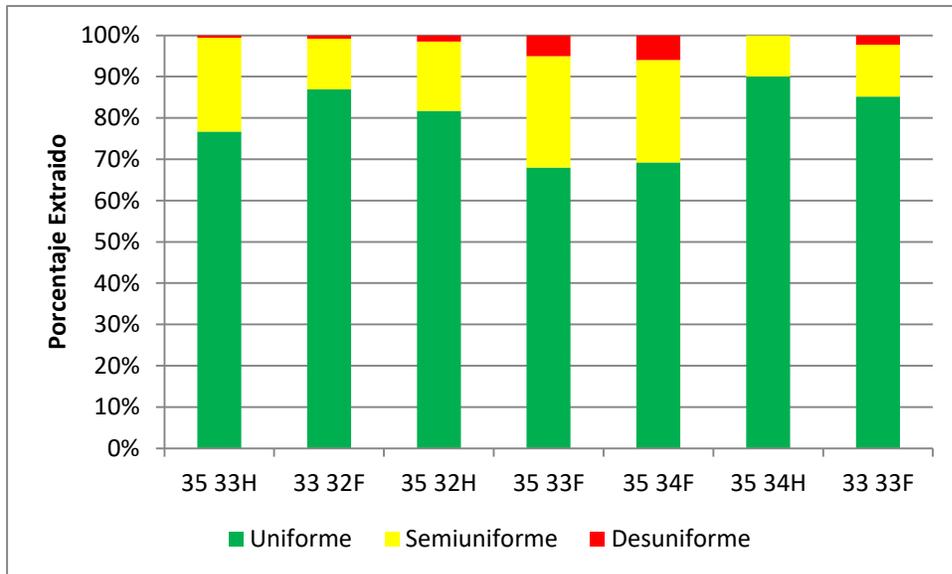
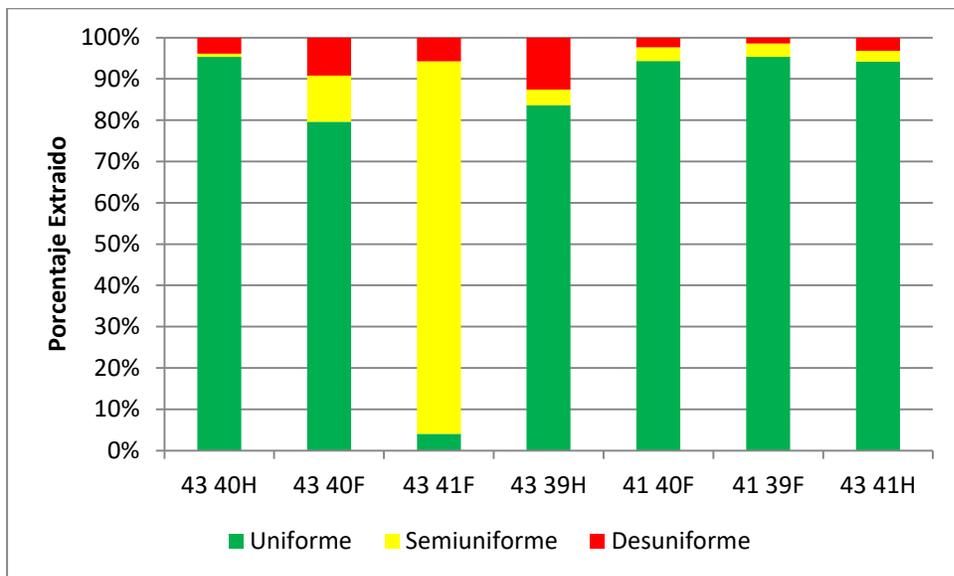


Figura 73: Uniformidad puntos a simular Esmeralda bloque 1.



**Figura 74: Uniformidad puntos a simular Esmeralda antiguo.**