



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

# **MODELAMIENTO DEL PELIGRO DE EVENTOS DE AGUA BARRO EN MINA EL TENIENTE EN LA PLANIFICACIÓN DE CORTO PLAZO.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

FELIPE EDUARDO LABRA BRAVO

PROFESOR GUÍA:

RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

KENJI BASAURE MATSUMOTO

RENÉ GÓMEZ PUIGPINOS

KIMIE SUZUKI MORALES

Este trabajo ha sido parcialmente Financiado por CONICYT/PIA Project AFB220002

SANTIAGO DE CHILE

2024

## **MODELAMIENTO DEL PELIGRO DE EVENTOS DE AGUA BARRO EN MINA EL TENIENTE EN LA PLANIFICACIÓN DE CORTO PLAZO.**

La intrusión de barro húmedo es un desafío constante en minas subterráneas, junto con el potencial de bombeos de agua barro, los cuales representan riesgos significativos para los trabajadores, equipos e infraestructuras en Mina El Teniente, como también para otras operaciones subterráneas en el mundo.

En este contexto, esta investigación presenta el desarrollo de un modelo probabilístico que integra un modelo de regresión logística con un modelo de clasificación del nivel de riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro, con el objetivo principal de estimar zonas de alto y mediano riesgo en la planificación de corto plazo en Mina El Teniente. Mediante un análisis univariable y multivariable, se identificaron las variables más significativas asociadas con la ocurrencia de eventos de agua barro, las cuales se incorporan en estos modelos de riesgo de corto plazo. Estos modelos incorporan variables operacionales, ambientales, topográficas y litológicas para determinar zonas de riesgo en los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda.

En particular, las variables operacionales corresponden a uniformidad y velocidad de extracción, mientras que las variables ambientales y topográficas incluyen la distancia desde el punto de extracción hasta la superficie, humedad en el punto de extracción (PE) medida en laboratorio y las precipitaciones. Además, se integró una variable relacionada con la litología extraída, específicamente el porcentaje de material quebrado, obtenido del software de flujo gravitacional FlowSim BC v6.3, calibrado con datos de la mina.

En términos generales, la evaluación de los modelos probabilísticos de corto plazo en el sector de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2 demostró una alta capacidad de predicción para estimar puntos de extracción en alto riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro, superando significativamente la capacidad predictiva de la Matriz de Criticidad implementada en El Teniente (Salazar et al. 2016). Los resultados obtenidos en la etapa de validación indican que el modelo probabilístico de corto plazo en el sector de Diablo Regimiento logra predecir un 86% de los eventos de agua barro en alto riesgo antes de su fecha de ocurrencia, a diferencia de la Matriz de Criticidad, que no logra detectar ningún evento de agua barro en estado de alerta. En el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, el modelo probabilístico predice el 78% de los eventos de agua barro en alto riesgo, mientras que la Matriz de Criticidad solo alcanza a estimar el 28% de los eventos en estado alerta.

Además, estos modelos probabilísticos determinaron con precisión las zonas de alto y mediano riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro. Este enfoque de modelado de riesgos emerge como una herramienta fundamental para la planificación a corto plazo y la toma de decisiones, con el objetivo de minimizar los riesgos asociados con eventos de agua barro en la Mina El Teniente. La robustez y capacidad predictiva de estos modelos sugieren su aplicabilidad en futuros sectores que enfrenten desafíos similares relacionados con la ocurrencia de eventos de agua barro.

## **Agradecimientos**

Agradecemos sinceramente los datos de entrada, los comentarios y la asistencia proporcionada por el personal de la División El Teniente, especialmente a Kenji Basaure y Eduardo Diez. También agradecemos la colaboración y revisión del equipo de modelamiento de BCTEC y BCLAB.

Extendemos nuestro agradecimiento al AMTC y al Departamento de Minas de la Universidad de Chile por su apoyo en este trabajo, financiado por el Proyecto CONICYT/PIA AFB220002.

## Tabla de contenido

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
1.    Introducción .....	1
1.1    Objetivo General .....	2
1.2    Alcances de la investigación .....	2
1.3    Metodología General del Estudio.....	2
1.4    Capítulos del Estudio .....	4
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>5</b>
2.    Estado del Arte .....	5
2.1    Minería de Caving.....	5
2.1.1    Método Block Caving .....	5
2.2    Agua barro en minería de Caving .....	6
2.2.1    Modelo conceptual de agua barro interno .....	7
2.2.2    Modelo conceptual de agua barro externo.....	8
2.3    Casos de estudios .....	10
2.3.1    PT Freeport.....	10
2.3.2    Mina Kimberley .....	13
2.3.3    División El Teniente (DET) .....	14
2.4    Modelamiento del Riesgo.....	16
2.5    Indicadores de control de extracción.....	17
2.6    Conclusiones de antecedentes bibliográficos .....	19
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>20</b>
3    Análisis de datos de los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda (Bloque 1 & 2).....	20
3.1    Eventos de agua barro en División El Teniente (DET).....	20
3.2    Eventos de agua barro en sectores analizados.....	22
3.3    Variables consideradas en el análisis estadístico .....	24
3.3.1    Simulación de flujo gravitacional a través de FlowSim BC v6.3 .....	26

3.3.2	Análisis de altura de columna extraída.....	30
3.3.3	Análisis de distancia a la superficie .....	34
3.3.4	Porcentaje de quebrado .....	39
3.3.5	Humedad de laboratorio .....	42
3.3.6	Análisis uniformidad de extracción.....	45
3.3.7	Velocidad de Extracción .....	48
3.3.8	Precipitación.....	53
<b>Capítulo 4 .....</b>		<b>56</b>
4	Construcción de modelos probabilísticos de eventos de agua barro en Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.....	56
4.1	Construcción de la base de datos de eventos de agua barro para regresión logística.....	56
4.2	Análisis univariable Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.....	57
4.3	Construcción modelo multivariable de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.....	60
4.4	Validación de modelos logísticos de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2 .....	64
4.5	Evaluación de resultados modelo probabilístico de eventos de agua barro .....	65
4.5.1	Diablo Regimiento .....	65
4.5.2	Esmeralda Bloque 1 & 2 .....	67
4.5.3	Comparativa de modelos probabilísticos con Matriz de Criticidad DET .....	69
4.5.4	Evaluación del riesgo del modelo probabilístico por tipo de eventos .....	70
<b>Capítulo 5 .....</b>		<b>72</b>
5.1	Aplicación de modelos probabilísticos.....	72
5.1.1	Aplicación en Diablo Regimiento .....	72
5.1.2	Aplicación en Esmeralda Bloque 1 .....	74
<b>Capítulo 6 .....</b>		<b>76</b>
6.1	Conclusiones generales .....	76
6.2	Recomendaciones y trabajo futuro .....	77
<b>Bibliografía.....</b>		<b>78</b>
<b>Anexos.....</b>		<b>81</b>

Anexo A .....	81
Anexo B .....	92
Anexo C .....	93
Anexo D .....	94

# Capítulo 1

## 1. Introducción

Múltiples minas a rajo abierto han alcanzado la profundidad límite sobre la cual dejaran de ser rentables económicamente (Fuentes & Caceres, 2004), lo que ha motivado a que muchas minas realicen un proceso de transición a un método de explotación subterránea (Morales, 2019). Entre los métodos subterráneos que han adquirido mayor relevancia se encuentran los métodos por hundimiento masivo, principalmente Block y Panel Caving, ya que su alta productividad y bajos costos operacionales le hacen un método de extracción rentable para yacimientos profundos masivos y de baja ley (Khodayari & Pourrahimian, 2015).

Sin embargo, debido al tamaño y a la profundidad de las operaciones de caving actuales y futuras, están propensas a sufrir diversos eventos críticos de riesgo geológico, como la ruptura de rocas, colapsos, hundimientos, chorros de aire e irrupciones (húmedas y secas) los cuales se han convertido en desafíos comunes para la industria minera (Cuello & Whiteman, 2020).

Aunque se utilizan varios términos en la industria y en la literatura disponible para describir una irrupción o una entrada repentina de material en áreas subterráneas, Butcher et al. 2000, define las irrupciones húmedas como entradas repentinas de barro desde puntos de extracción u otras aberturas subterráneas. Estos fenómenos pueden tener orígenes muy diferentes, pero pueden producir los mismos resultados: lesiones, pérdida de vidas, daños a la propiedad, dilución excesiva y retrasos en la producción o, en el caso extremo, cierre de minas (Jakubec, 2012).

El barro es generado a partir de partículas finas que en general resultan del proceso de fragmentación secundaria en la columna de extracción. Estas partículas se mezclan con sustancias acuosas en diferentes tipos de condiciones, tales como deshielo cordillerano, filtraciones de relaves, acuíferos y condiciones meteorológicas (nival y pluvial). Esta mezcla viaja a través de la columna de mineral y llega a los puntos de extracción (PE) ocasionando eventos de agua barro que pueden ser desencadenados producto de la extracción de material, la sismicidad inducida y descuelgues (Jakubec, 2012; Flores, 2019; Ginting & Pascoe, 2020).

En diferentes minas subterráneas del mundo se han registrado eventos de agua barro en sus labores, como El Teniente, Chile (Ferrada, 2011), Palabora, Sudáfrica (Paerzold et al. 2020), IOZ y DOZ en Indonesia (Huber et al., 2000; Widijanto, et al., 2012; Edgar et al., 2020; Ginting & Pascoe, 2020). Algunas herramientas de mitigación y control tomadas en las operaciones van desde: túneles de drenaje que permiten el traslado del agua hacia el exterior de la mina, equipos tele-comandados en zonas críticas, matrices de riesgo para los PE, extracción controlada (Samosir, 2008; Edgar et al., 2020).

En el contexto de la planificación a largo plazo en la Mina El Teniente, se han implementado modelos de riesgo de declaraciones de agua barro que permiten cuantificar mineral saturado remanente y/o evaluar planes mineros (Navia et al., 2014; Garcés et al., 2016; Castro et al., 2018; Pérez, 2021; Salas, 2022). Estas declaraciones de agua barro se realizan antes de que ocurran los eventos, generalmente al detectarse condiciones en el PE en forma de mineral húmedo (Navia, 2014). Sin embargo, hasta el momento, los estudios desarrollados no contemplan una metodología para anticiparse a los eventos de agua barro para la planificación de corto plazo. Por ende, se requieren estudios que posibiliten la predicción futura de la ocurrencia de eventos de agua barro en los puntos de extracción, incorporando variables operacionales como la

uniformidad, la humedad y la fragmentación, entre otras. Esto permitiría identificar zonas de alto, mediano y bajo riesgo, lo que favorecería a la planificación de corto plazo para definir estrategias de extracción.

### 1.1 Objetivo General

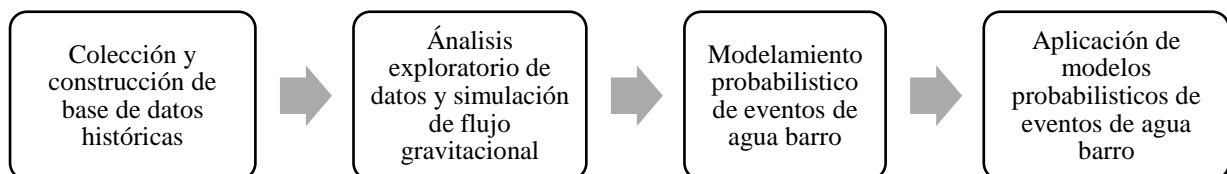
Desarrollar un modelo probabilístico de eventos de agua barro incorporando variables operacionales de corto plazo con la finalidad de determinar zonas de alto y mediano riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro.

### 1.2 Alcances de la investigación

1. Definir la revisión bibliográfica sobre eventos de agua barro, su impacto y las medidas de mitigación aplicadas en las operaciones de Block/Panel Caving.
2. Analizar y determinar las variables críticas que influyen en la ocurrencia de eventos de agua barro considerando variables operacionales, ambientales, topográficas y litológicas.
3. Simular el flujo gravitacional para estimar variables litológicas a escala de puntos de extracción utilizando el software FlowSim BC v6.3
4. Desarrollar un modelo probabilístico que permita estimar zonas de alto y mediano riesgo para la ocurrencia de eventos de agua barro en la planificación de corto plazo.
5. Calibrar y validar los modelos probabilísticos de eventos de agua barro construidos.
6. Evaluar y/o aplicar los modelos probabilísticos de eventos de agua barro.

### 1.3 Metodología General del Estudio

La metodología general empleada para el desarrollo de esta investigación se muestra en la Figura 1, la cual se compone de 4 etapas:



**Figura 1: Metodología general**



## Etapa 1 Colección y análisis de bases de datos históricas

Esta etapa tiene como objetivo coleccionar y construir las bases de datos de los sectores a evaluar. Las bases de datos históricas que se coleccionan son las siguientes:

- Extracción histórica de los sectores a nivel de punto de extracción y a escala diaria.
- Caudales de agua medidos en aforos a escala mensual en unidades de litros/segundo.
- Precipitaciones históricas a escala diaria y caudales de agua medido en aforos
- Ubicación y estado histórico de los puntos de extracción.
- Geología y topografía de los sectores (modelo de bloques in-situ).
- Humedades, tanto observada en operación como procedente de resultados de laboratorio.
- Fragmentación y porcentajes de litologías medidos en el punto de extracción.

## Etapa 2 Análisis exploratorio de datos y simulación de flujo gravitacional

Esta etapa se enfoca en explorar las relaciones entre variables operacionales, ambientales, topográficas y litológicas con los eventos de agua barro, utilizando técnicas estadísticas como análisis univariable, gráficos y medidas estadísticas. Tras la recopilación de datos, se identificó una discontinuidad en las mediciones de fragmentación y litologías en los puntos de extracción. Dado lo anterior, se utilizó el software FlowSim BC v6.3 para modelar el flujo gravitacional y estimar la fragmentación, así como las diversas unidades litológicas en los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.

## Etapa 3 Modelamiento probabilístico de eventos de agua barro

Esta etapa tiene como objetivo de realizar la construcción y calibración de un modelo probabilístico de eventos de agua barro mediante la técnica de regresión logística más un modelo de clasificación del nivel del riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro. Las actividades de esta etapa son las siguientes:

- **Construcción de base de eventos:** Un modelo de regresión logística requiere dos conjuntos, eventos y no eventos. Dado el desequilibrio entre días con ocurrencia de eventos y días sin ellos, se creó una base de datos donde el conjunto de eventos incluía todas las instancias de eventos de agua barro. Para el conjunto de no eventos, se seleccionaron datos sin ocurrencia de eventos de agua barro, manteniendo una proporción del 75% de no eventos y el 25% restante de datos con eventos.
- **Modelamiento multivariable:** Se desarrollan y seleccionan modelos de eventos de agua barro mediante un análisis multivariable de regresión logística, donde se exploran y evalúan múltiples variables predictoras para determinar su influencia en la ocurrencia de eventos de agua barro.
- **Calibración del modelo logístico de eventos de agua barro:** El modelo logístico es calibrado respecto de los datos reales de eventos de agua barro. El objetivo de la calibración es encontrar la probabilidad de corte (cutoff) óptima que entregue los mejores resultados para los indicadores de desempeño (KPI) principales como la tasa de verdaderos positivos y negativos, sumado a la exactitud global.
- **Modelo de clasificación del nivel de riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro:** Para establecer distintas estrategias de control por zonas de riesgo de agua barro, se desarrolla un modelo adicional a la regresión logística. En este modelo, se establecen

condiciones específicas en ciertas variables para clasificar las zonas de ocurrencia de agua barro predichas por la regresión logística como de alto o medio riesgo.

- **Evaluación del modelo probabilístico de eventos de agua barro:** El modelo probabilístico de eventos de agua barro es evaluado en términos de indicadores de desempeño, tales como cantidad de eventos de agua barro declarados en alto riesgo y el área declarada en alto y mediano riesgo de eventos de agua barro.

#### **Etapa 4 Aplicación de modelos probabilístico de eventos de agua barro**

Esta etapa tiene como objetivo aplicar los modelos probabilísticos en planes de corto plazo en los sectores evaluados. En el corto plazo se podrán determinar las zonas de riesgo alto y medio, en donde pueden ocurrir eventos de agua barro. Las actividades de esta etapa son las siguientes:

- **Aplicación de modelos probabilísticos de eventos de agua barro:** Se aplican los modelos probabilísticos de eventos de agua barro construidos en planes de corto plazo.
- **Análisis de resultados:** Se determinan las zonas de riesgo alto y medios, y los posibles puntos de extracción con alta probabilidad de ocurrencia de eventos de agua barro.
- **Conclusiones y recomendaciones:** Una vez realizada la evaluación se concluye respecto a las zonas de alto y mediano riesgo, y determinando las características o factores que aumentan la probabilidad de que se genere un evento de agua barro.

#### **1.4 Capítulos del Estudio**

Este trabajo está compuesto por los siguientes capítulos:

**Capítulo 2:** Este capítulo muestra el estado del arte sobre el barro en operaciones subterráneas, abarcando desde su formación, su origen, tipos de barro, su presencia en operaciones, las principales medidas de mitigación y los principales avances sobre modelos de riesgo de agua barro para la planificación minera. Al final del capítulo se encuentran las respectivas conclusiones de la revisión de la literatura.

**Capítulo 3:** En este capítulo se desarrolla un análisis exploratorio a través de estadísticas básicas entre los puntos de extracción con registro de eventos de agua barro, y las variables estudiadas. Además, se incluye el análisis de la simulación de flujo gravitacional a través del software FlowSim BC v6.3.

**Capítulo 4:** En este capítulo se desarrolla un modelo probabilístico de eventos de agua barro para la planificación minera de corto plazo, incorporando variables operacionales ambientales, topográficas y litológicas. Comenzando con un análisis univariable con el objetivo de determinar la significancia estadística que presenta cada variable por si sola con los eventos de agua barro. Para finalmente construir y evaluar el modelo probabilístico de eventos de agua barro en términos de indicadores de desempeño (tasa de verdaderos positivos, tasa de verdaderos negativos, exactitud global), y área declarada en alto y mediano riesgo de eventos de agua barro.

**Capítulo 5:** En este capítulo se aplican los modelos probabilísticos de eventos de agua barro construidos en planes de corto plazo.

**Capítulo 6:** En este capítulo se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

## Capítulo 2

### 2. Estado del Arte

En este capítulo se presenta el estado del arte respecto al fenómeno del agua barro, desde su origen hasta como se ha enfrentado operacionalmente la industria minera del caving.

#### 2.1 Minería de Caving

La minería de caving es un tipo de minería subterránea donde las cavidades generadas por el mineral extraído son rellenadas simultáneamente con el material sobre este (mineral, mientras dura la explotación, y estéril, una vez finalizada). Los métodos de caving presentan bajos costos y altos ritmos de producción que pueden ir en rangos de 10.000 a 150.000 toneladas al día (Brown, 2002).

Los métodos de caving se clasifican principalmente en:

- Block Caving
- Panel Caving
- Sublevel Caving

##### 2.1.1 Método Block Caving

El Block Caving es un método de explotación a gran escala aplicable a cuerpos masivos de mineral de baja ley donde la gravedad se utiliza junto con las tensiones internas de roca para fracturar y romper la masa rocosa. La base del bloque se fractura por voladura, lo que destruye su capacidad para soportar la roca superpuesta (Hustrulid & Bullock, 2001).

Las principales características del block caving son las siguientes:

- Grandes dimensiones verticales y horizontales.
- Una masa rocosa que se romperá en pedazos de tamaño manejable.
- Una superficie que se deja hundir.

La Figura 2 muestra las características generales del método de Block Caving.

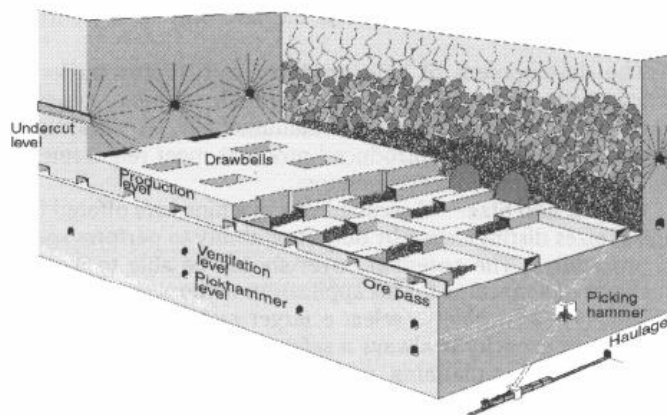


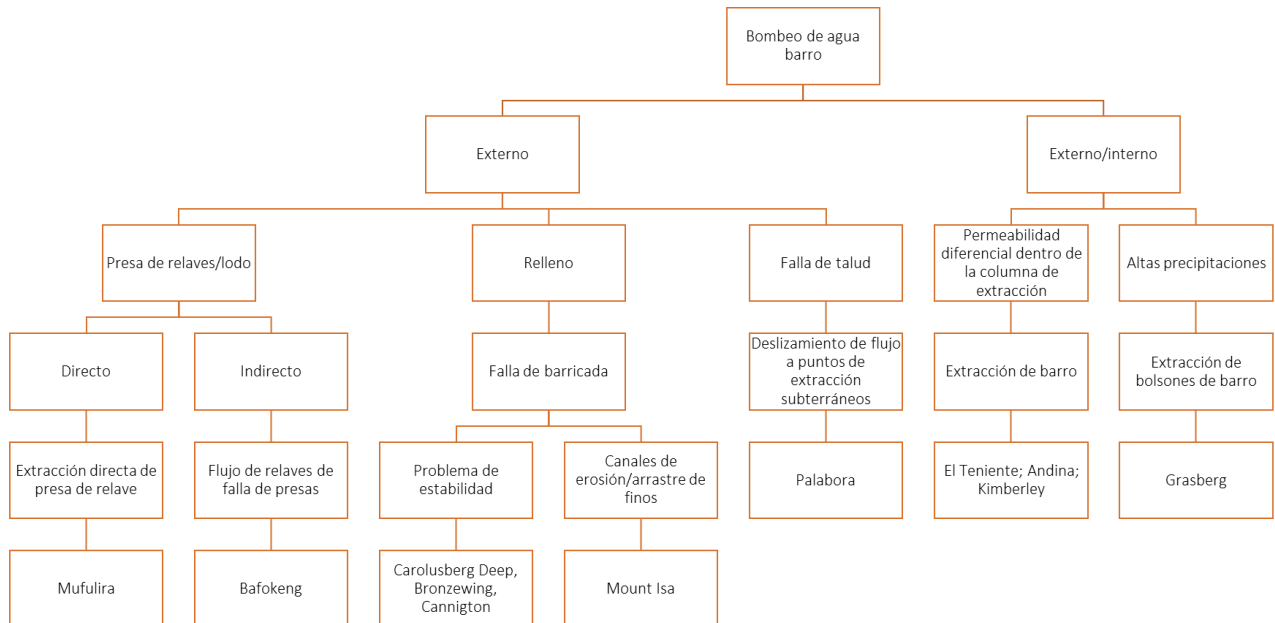
Figura 2: Método de Block Caving (Hamrim, 2001)

Un beneficio principal de la minería de Block Caving es la alta capacidad de producción en relación con otros métodos de minería subterránea. Algunas de las minas de caving más grandes del mundo están produciendo hasta 75,000 toneladas-día a partir de bloques mineros individuales (mina DOZ en Indonesia), y las minas que operan en múltiples bloques mineros están produciendo más de 130,000 toneladas-día, como ocurre en División El Teniente (Codelco, 2016).

## 2.2 Agua barro en minería de Caving

Las minas de Block/Panel Caving y Sublevel Caving son operaciones inherentemente susceptibles a bombeos de agua barro, debido a que generan fuentes de finos (proceso de fragmentación secundaria) y acumulaciones de agua en superficie y/o subterráneas (Ferrada, 2011).

Butcher et al. 2000 propusieron una clasificación de los eventos de agua barro según la fuente de origen del barro y pueden ser clasificado como interno o externo como se muestra en la Figura 3. Los barros de fuente interna ocurren de manera natural como parte del proceso del caving debido a la formación de material fino y agua en la columna de extracción, mientras que los barros de origen externos se relacionan con la conexión entre una zona de hundimiento y una fuente de barro fuera de las labores subterráneas. La fuente podría provenir del colapso repentino del suelo a través de los niveles superiores de una mina o a través del colapso de la superficie (McCarthy y Harvey, 1998), o del colapso de las presas de relaves. El colapso de la presa de relaves fue la causa del peor desastre de entrada de barro registrado cuando unos 450.000 metros cúbicos de barro, principalmente relaves, entraron en la mina Mufulira, causando grandes daños y la pérdida de 89 vidas (McCarthy & Harvey, 1998; Butcher et al., 2005).



**Figura 3: Clasificación de barro (modificado de Butcher et al., 2000)**

Según Butcher et al. (2005) han sugerido que se requieren cuatro factores para desencadenar la entrada de barro. Estos incluyen la capacidad de acumulación de agua, la presencia de posibles minerales formadores de barro, una perturbación en la columna de mineral y la capacidad de descarga del barro en un punto de extracción (ver Figura 4).

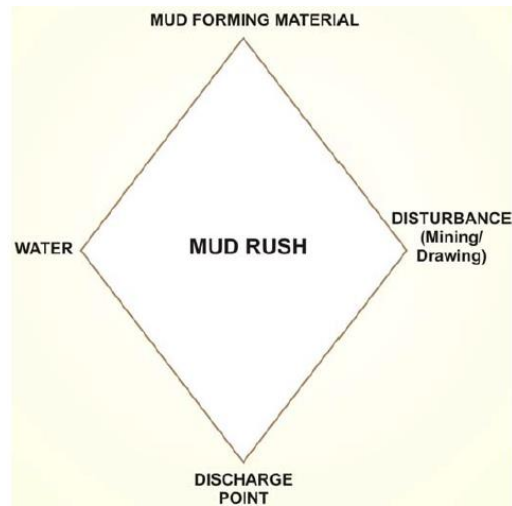


Figura 4: Factores de una entrada de barro (Butcher et al. 2000)

### 2.2.1 Modelo conceptual de agua barro interno

Una vista conceptual de la formación de agua de barro se muestra en la Figura 5, que ejemplifica la aparición de barro en Mina El Teniente. El barro en este caso se debe principalmente al agua de lluvia o nieve acumulada en la superficie que se infiltra en la mina y se mezcla con mineral fino formado debido a la fragmentación secundaria que se produjo durante el proceso de caving (Salas et al. 2022). Otro aspecto en esta visión conceptual es la diferencia topográfica, que se refiere a la distancia de la fuente potencial y los canales a través de los cuales el barro o el agua pueden ingresar al área de la cavidad (Butcher et al. 2000)

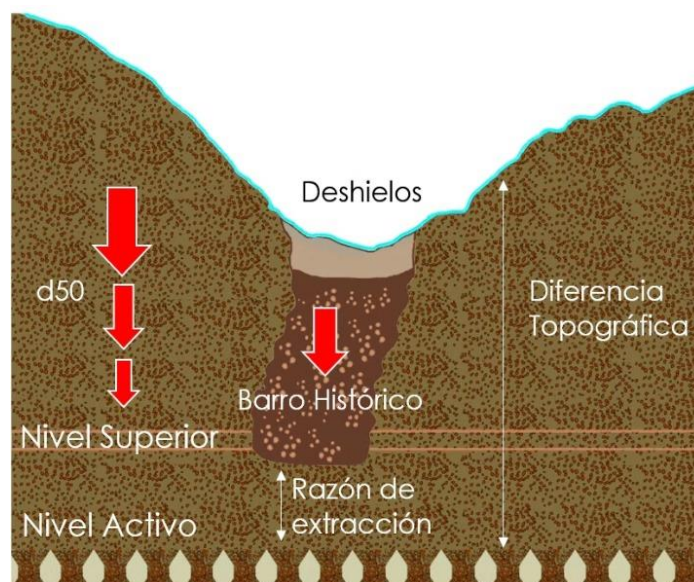


Figura 5: Modelo conceptual de agua barro interno (Salas et al. 2022)

Adicionalmente, el flujo hace que se produzca una permeabilidad diferenciada dentro de la columna de extracción. La preexistencia de fuentes de agua/barro en la superficie o de un sector antiguo/superior y un tiraje aislado (alta velocidad de extracción) deriva en la ocurrencia de canales preferenciales o zonas de alta conductividad de diámetro pequeño, por ejemplo 0.3 m dentro de un elipsoide de movimiento mayor diámetro (15 m de diámetro), tal como muestra la Figura 6 (Gelcich, 2018).

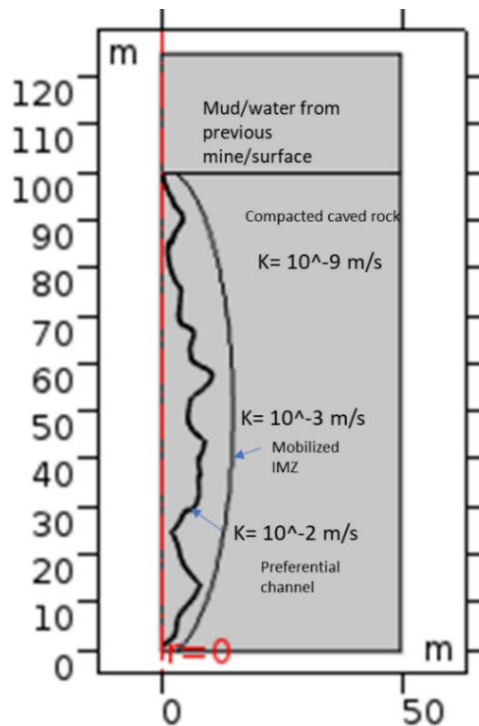
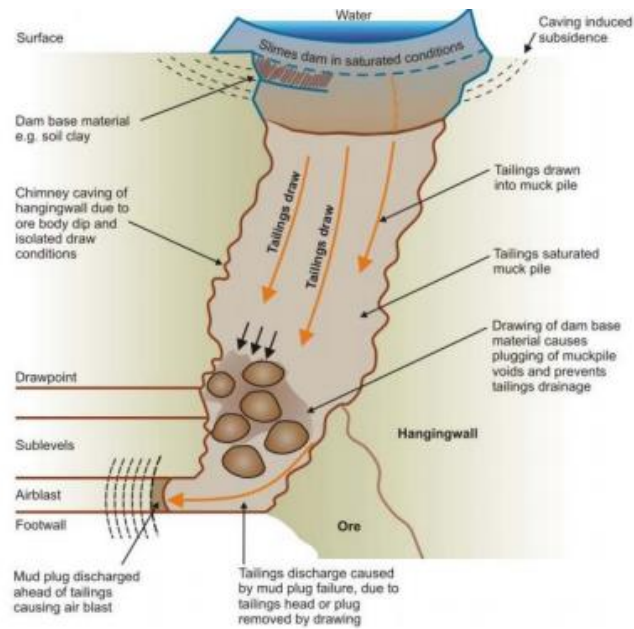


Figura 6: Modelamiento hidrogeológico de agua barro en el Teniente (Gelcich, 2018)

### 2.2.2 Modelo conceptual de agua barro externo

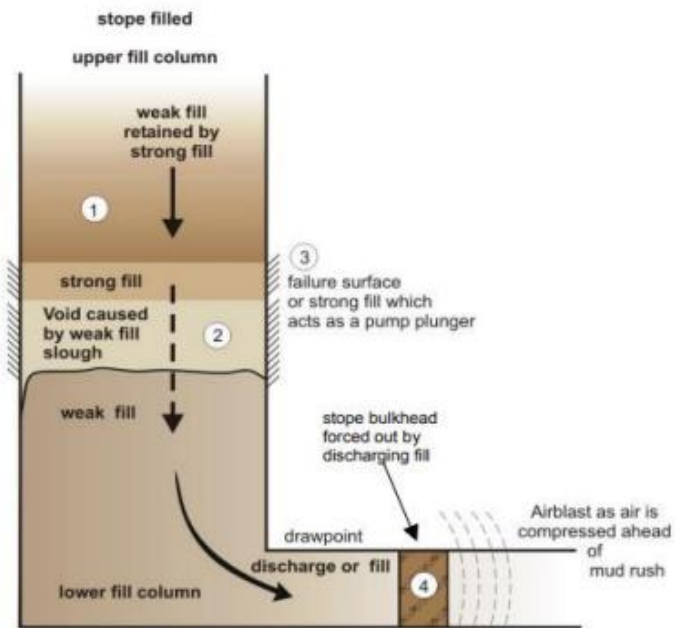
La formación de agua barro de origen externo son generados principalmente por tres fuentes: la deposición de relaves, la falla de los materiales de relleno y los deslizamientos de taludes (Brown, 2003).

La deposición de relaves implica la acumulación de materiales finos sobre el cráter de subsidencia o en las proximidades, seguida por la adición de agua a los materiales finos, lo que resulta en una mezcla que puede descender a través de la columna de mineral quebrado (ver Figura 7). La combinación de barro y material quebrado puede crear arcos inestables que pueden liberarse abruptamente, ya sea debido al peso de la columna sobre ellos o a la eliminación de tapones que sirven como contención de barro (Butcher et al. 2000).



**Figura 7: Modelo conceptual deposición de relave (Laubscher et al. 2000)**

La falla de los materiales de relleno, especialmente si son de baja calidad, puede resultar en una descarga violenta si la compuerta de contención llega a fallar. Esta falla de la compuerta puede ser causada por varios factores, tales como un diseño deficiente, construcción inadecuada, una carga inicial demasiado elevada para el diseño de la compuerta y un sistema de drenaje de agua ineficiente, tal como muestra la Figura 8 (Butcher et al. 2000).



**Figura 8: Modelo conceptual de falla de materiales de relleno (Butcher et al. 2000)**

La formación de barro, como resultado del deslizamiento de taludes, ocurre cuando dicho talud experimenta un fallo, lo que podría resultar en la infiltración de barro en las labores subterráneas. Este fenómeno se acentúa si las paredes del rajo están conformadas por material arcilloso blando o arcilla esquistosa meteorizada, ya que un incremento en el nivel freático podría ser la causa del colapso del talud, tal como muestra la Figura 9 (Butcher et al. 2000).

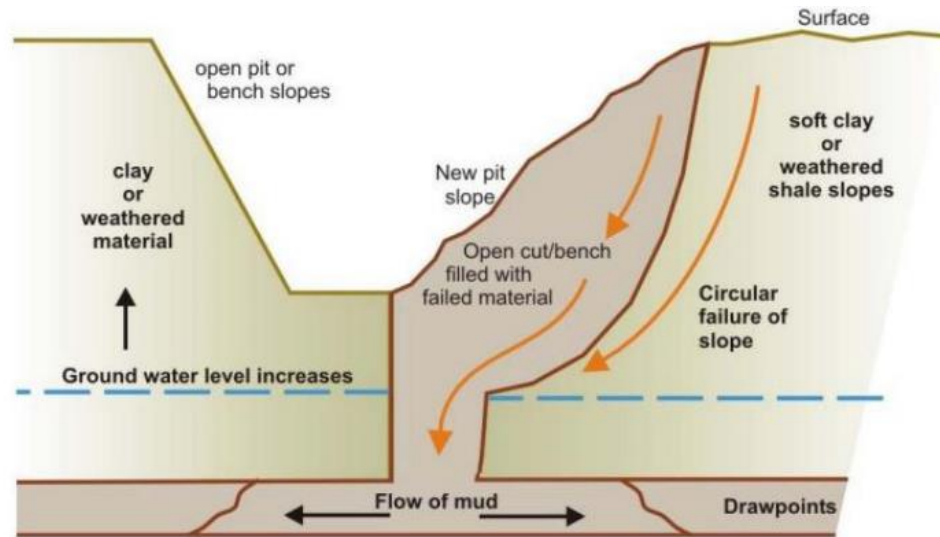


Figura 9: Modelo conceptual de deslizamiento de talud (Butcher et al. 2000)

## 2.3 Casos de estudios

La mayor parte de las operaciones mineras han identificado el bombeo de agua barro como un riesgo potencial, por lo que suelen monitorear el contenido de humedad y la fragmentación presente en los puntos de extracción (Samosir, et al, 2008). Lo anterior se realiza con la finalidad de categorizar los puntos de extracción en función de la probabilidad de ocurrencia de bombeo de barro en puntos de riesgo bajo, medio y alto (Jakubec, et al, 2016).

### 2.3.1 PT Freeport

La mina Grasberg (ver Figura 10) es operada por Freeport McMoRan. La mina se encuentra en las tierras altas de la cordillera de Sudirman en la provincia de Papúa, Indonesia. Las operaciones del complejo Grasberg abarcan la minería a cielo abierto y la minería subterránea, donde se destacan las siguientes operaciones Block/Panel Caving:

- Deep Ore Zone (DOZ)
- Deep Mill Level Zone (DMLZ)
- Grasberg Block Cave (GBC)
- Intermediate Ore Zone (IOZ)
- Gunung Biji Timur (GBT) or “East Ore Mountain” in the Indonesian language.





**Figura 10: Complejo Grasberg (Brannon, et al., 2008)**

Las minas subterráneas en PT Freeport Indonesia (PTFI) tienen una historia de eventos de agua barro en las áreas de producción. Se han producido eventos de barro de hasta 2.000 metros cúbicos (Barber et al., 2000). El barro de IOZ, contiene una gran cantidad de material fino, entre el 25-50% (< 2 mm), para este tipo de material se ha determinado que se necesita un 8% de humedad para que el barro fluya (Huber, et al., 2000; Widiyanto, et al., 2012). El ingreso repentino de barro en esta mina se puede deber a tronaduras, movimientos de equipos, aumento en la presión de poros, cambios de esfuerzos o caídas de material (Huber, et al., 2000).

Los eventos de agua barro son uno de los principales desafíos para DOZ debido a las siguientes condiciones:

- Presencia de material fino en la cavidad
- Presencia de arcillas
- Presencia de agua
- Fuertes lluvias
- Conexión con minería de superficie
- Conexión con sectores mineros anteriores

Basado en la experiencia de los eventos de entrada, PT Freeport desarrolló un sistema de clasificación. Hay nueve clases de barro húmedo (ver Tabla 1), que se determinan a partir del tamaño del material y el contenido de humedad (Ginting & Pascoe 2020).

**Tabla 1: Clasificación agua barro DOZ (Ginting & Pascoe 2020)**

Level of wetness/water content	Material size $\geq 5$ cm (M)		
	M > 70% (dominated by coarse material)	30% < M $\leq$ 70% (mixture of coarse and fine/medium material)	M $\leq$ 30% (dominated by fine material)
< 8.5% (dry)	A1	B1	C1
8.5-11% (moist)	A2	B2	C2
$\geq$ 11% (wet)	A3	B3	C3

La matriz de clasificación se complementa con información de cada evento de agua barro para determinar el riesgo de evento. De acuerdo con la puntuación obtenida, se establecieron 3 categorías. Si la puntuación de riesgo está entre 0 y 1,5, es un riesgo bajo; de 1.6 a 2.0, riesgo medio; y de 2.1 a 3, alto riesgo (ver Tabla 2).

**Tabla 2: Clasificación del riesgo de evento en DOZ (Ginting & Pascoe 2020)**

Factor	Bajo	Medio	Alto	Peso del factor	Ejemplo puntuación
Clasificación	A1, A2, B1, C1	A3	B2, B3, C2, C3	30%	3 x 0.3 = 0.9
Tiraje aislado	0-1 DP	2-5 DP	6-9 DP	20%	2 x 0.2 = 0.4
Altura de extracción	0-100 m	100-200 m	>200 m	10%	3 x 0.1 = 0.3
Frecuencia de bombeo de agua barro	<10	10-20	>20	20%	3 x 0.2 = 0.6
Volumen de bombeo de barro	<500 m <sup>3</sup>	500-1000 m <sup>3</sup>	>1000 m <sup>3</sup>	10%	2 x 0.1 = 0.2
Distancia de bombeo de barro	<75 m	75-100 m	>150 m	10%	3 x 0.1 = 0.3
Puntuación	1	2	3	-	2.7

Además, las estrategias empleadas para mitigar los eventos de agua barro en DOZ son las siguientes:

- Equipos automatizados
- 24 horas de aislamiento del último cubo retirado de forma remota
- Establecer la tasa de extracción en función del riesgo de mudrush (bajo riesgo: 480 t/día, riesgo medio: 302 t/día, alto riesgo: 160 t/día)
- Exclusión de un punto de giro problemático o uso de actividades de restricción (por ejemplo, construcción de barreras) en puntos de tracción adyacentes en paneles de lodo.
- Relación de mezcla del total por orden de extracción de turno (máximo de 55% de material seco y 45% de material húmedo).
- Cumplimiento de extracción y altura de columna mineral para monitorear la uniformidad.

### 2.3.2 Mina Kimberley

La mina Kimberley, es una operación subterránea que está ubicada en Kimberley, Sudáfrica y está compuesta por tres minas Dutoitspan, Bultfontein y Wesselton. Los eventos de agua barro en esta mina principalmente se deben al quiebre de la kimberlita y al agua infiltrada por las lluvias en la columna de extracción.

Los eventos de agua barro en Dutoitspan han resultado en graves daños a la infraestructura minera, con la lamentable pérdida de una vida (Holder, et al., 2013). A partir de lo anterior, se ha determinado combatir/mitigar los eventos de agua barro considerando una serie de variables relacionadas con el PE, como la humedad, extracción, uniformidad, entre otras, y les otorgan un puntaje en donde se clasifica el riesgo de bajo a muy alto a través de la Tabla 3.

Las variables evaluadas son las siguientes:

- Agua en la superficie
- Drenaje de la mina
- Agua infiltrada
- Humedad del punto de extracción
- Porcentaje de dilución en el punto de extracción
- Uniformidad de la extracción
- Condición estructural del punto de extracción
- Extracción del punto de extracción
- Colgaduras del punto de extracción

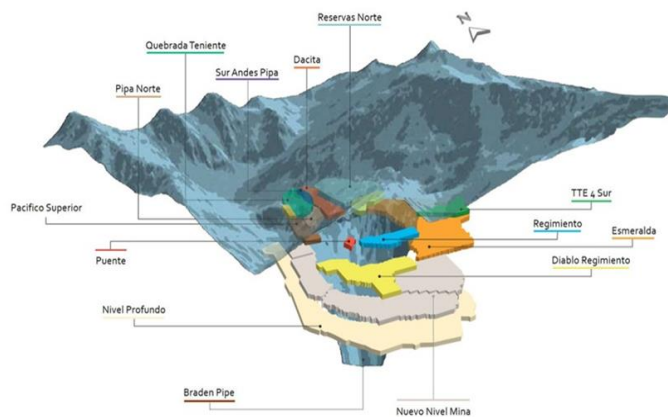
**Tabla 3:Matriz de riesgo de evento de agua barro (Resumido, Holder et al, 2013)**

<b>Puntaje total y color del riesgo</b>	<b>Calificación del riesgo</b>	<b>Tolerancia del riesgo</b>	<b>Mitigación</b>
0 – 30	Bajo		Ninguna, a menos que cambien las condiciones
30 – 45	Moderado	Aceptable	Revisión de estrategias de control de extracción y drenaje de las áreas afectadas y aumentar el monitoreo
45 – 60	Alto	No deseado	Restringir accesos a zonas de peligro, reducir la extracción en puntos afectados, garantizar que se cumplen las medidas de mitigación
Mayor a 60 ( zona roja)	Muy Alto	Inaceptable	Evacuación inmediata de la zona roja, intervención de gestión urgente para asegurar la implementación de las medidas de mitigación necesarias

### 2.3.3 División El Teniente (DET)

El Teniente (Figura 11) es la mina subterránea de cobre más grande del mundo y la sexta mina de cobre más grande en términos de tamaño de reserva. Se encuentra a 80 km al sur de Santiago en la cordillera de los Andes. El Teniente ha tenido problemas de agua barro en múltiples sectores entre los que se encuentran los siguientes:

- Diablo Regimiento
- Reservas Norte
- Dacita
- Pipa Norte
- Sur Andes Pipa
- Esmeralda



**Figura 11: Sectores del Teniente (Garcés et al. 2016)**

En la mina Teniente se han registrado varios eventos de agua barro a lo largo del tiempo, algunos de ellos con consecuencias para las personas y otros sin mayores repercusiones. Hasta el año 2021, se han contabilizado un total de 49 eventos de este tipo. Entre ellos, destaca un trágico suceso ocurrido en 2007 en el sector Diablo Regimiento, cuando un violento evento de agua barro cubrió por completo un LHD. Lamentablemente, el operador del vehículo perdió la vida debido a la asfixia causada por el incidente.

En función de lo anterior, en la mina El Teniente se ha implementado un enfoque proactivo en la gestión de los eventos de agua barro, utilizando una matriz de riesgo diseñada específicamente para evaluar el riesgo de agua barro. Esta herramienta combina inspecciones de terreno con datos históricos para su desarrollo. Además, se ha refinado con información previa y se ha empleado una herramienta de solución de problemas (solver) de Excel para ajustar los parámetros.

La información de la matriz de riesgo incorpora las siguientes variables operacionales:

- Altura de extracción
- Humedad de laboratorio
- Uniformidad
- Cantidad de conglomerado
- Velocidades de extracción

Este conjunto de variables junto con otras variables fijas se utiliza para hacer un cálculo de riesgo utilizando coeficientes beta. Finalmente, el valor obtenido se clasifica bajo una matriz de decisión definiendo los estándares o protocolos a utilizar.

El Teniente también ha empleado estrategias para mitigar los eventos de agua barro, se ha determinado que es necesario un monitoreo constante, una extracción controlada y un diseño minero favorable. Se han tomado medidas preventivas para la entrada de barro, como el monitoreo de la columna de extracción, la fragmentación y la humedad. Fijaron límites para las tasas de extracción: una tasa mínima de 21 toneladas/día y una tasa máxima de 189 toneladas/día en zonas de alto riesgo, y una tasa máxima de extracción de 360 toneladas/día en general. Además, fijaron un mínimo del 60% en la uniformidad de extracción en zonas de alto riesgo.

El Teniente también implementó una matriz de clasificación para evaluar el estado del punto de extracción (PE) y el riesgo de entrada de barro (Salazar et al. 2016). En la Tabla 4, se presenta esta matriz, que considera los factores mencionados anteriormente, como la humedad cualitativa y el porcentaje de granulometría fina presente (<25 cm). Con esto, se definen 3 condiciones para el PE: normal (verde), en observación (amarillo) o en estado de alerta (rojo).

**Tabla 4: Matriz de criticidad El Teniente (modificado de Salazar et al. 2016)**

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	Green	Green	Green	Green
	H1: Levemente húmedo	Green	Green	Yellow	Yellow
	H2: Húmedo	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	H3: Barro incipiente	Green	Yellow	Red	Red
	H4: Barro	Yellow	Red	Red	Red
	A: Agua	Green	Green	Yellow	Red

La humedad cualitativa considerada en El Teniente se clasifica por observación visual en la mina. Una imagen representativa para determinar la humedad cualitativa en un punto de extracción se muestra en la Figura 12:



**Figura 12: Humedad cualitativa El Teniente**

## 2.4 Modelamiento del Riesgo

Existen múltiples estudios en los cuales se busca modelar el riesgo en una operación de caving, una herramienta recurrente en dichos estudios es el uso de las regresiones logísticas, las cuales a partir de los datos de la operación, permiten estimar la probabilidad de ingreso de agua barro (Garcés, et al , 2016; Navia, et al, 2014, Salas, 2022). Los modelos de regresión logística aplicados al modelamiento de riesgo de declaración de agua barro relacionan las variables operacionales y del entorno con el riesgo operacional a escala mensual, permitiendo cuantificar reservas de mineral seco y húmedo (Castro et al., 2018). La Tabla 5 presenta una recopilación de modelos de riesgo propuestos para cuantificar el ingreso de agua en las minas de Block Caving.

**Tabla 5: Modelos de riesgo de declaración de agua-barro para la planificación de largo y corto plazo, Modificado de (Pérez, 2021)**

<b>Modelo (Autor)</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>Sensibilidad (%)</b>	<b>Especificidad (%)</b>	<b>Precisión (%)</b>	<b>Comentario</b>
<b>Modelo 1 (Navia, et al., 2014)</b>	Velocidad de extracción (ton/m <sup>2</sup> día); Material fino en el punto (%); Altura de columna extraída (m); Época del año (binaria)	NA	NA	<b>74</b>	Modelo desarrollado utilizando datos de la mina Diablo Regimiento (DET), que posibilita la identificación de los puntos de extracción declarados con riesgo de entrada de agua barro.
<b>Modelo 2 (Garcés, et al., 2016)</b>	Extracción (%); Altura de columna primaria (m); Cantidad de vecinos en estado agua-barro (un); Época del año (binaria)	NA	NA	NA	Modelos construidos en DET para la entrada de agua barro, tanto vertical como lateral.
<b>Modelo 3 (Castro, et al., 2018)</b>	Porcentaje de columna in situ extraída (%); Altura de columna de roca primaria (m); Depresión topográfica; Flujo de agua mensual (l/s); Vecinos barro (un)	<b>70</b>	<b>93</b>	<b>84</b>	Modelo desarrollado para los sectores de Sur Andes Pipa y Pipa Norte (DET). Este modelo posibilita la clasificación de la entrada de lodo húmedo, tanto en términos verticales como laterales.
<b>Modelo 4 (Pérez, 2021)</b>	Altura de extracción (m); Caudal de agua mensual (l/s); Vecinos barro (un); Ingreso del quebrado (binaria); Zona de riesgo móvil (binaria)	<b>81</b>	<b>81</b>	<b>81</b>	Modelo de riesgo utilizando datos de mina Esmeralda (DET) que considera la variación de la elevación de la superficie a lo largo del tiempo, en función de la extracción y del ángulo de reposo del material superficial.

Modelo (Autor)	VARIABLES	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	Precisión (%)	Comentario
Modelo 5 (Navia, 2021)	Humedad ( 1 a 5); Vecino barro ( 1 a 6);Uniformidad de la extracción; Altura de columna acumulada; distancia horizontal desde el PE a sector antiguo con barro (m)	89	79	81	Navia, (2021), construyó 12 modelos, el con mejor desempeño se muestra en la tabla, este es el único modelo tanto a corto como a largo plazo.
Modelo 6 (Salas, 2022)	Extracción; Porcentaje Quebrado; Porcentaje Secundario; Porcentaje Primario; Fragmentación d50; Precipitación [mm]; Invierno/Primavera; Distancia a la superficie; Vecinos con eventos de barro	68 a 74	70 a 76	69 a 75	Modelos construidos en DET para la estimación de ingreso de agua barro, en Cuenca Norte, Reno, Centro y Sur.
Modelo 7 (Varian, 2022)	Clasificación PE; Extracción 14 días; Vecinos barro 36 m; Clasificación PE adyacentes; HOD; Uniformidad 3 días clúster; Extracción adyacente en 14 días	NA	NA	93	Modelo desarrollado utilizando datos de la mina DOZ, identifica la probabilidad de eventos de agua barro a escala de PE en función de las condiciones del material, y extracción.

## 2.5 Indicadores de control de extracción

En esta sección se presenta una recopilación de los principales indicadores de control de extracción que se tienen en cuenta en una operación de Block/Panel Caving, para controlar los riesgos descritos anteriormente.

- **Velocidad de extracción:** El concepto de velocidad de extracción se refiere en general a las toneladas extraídas en un área definida en cierta escala de tiempo y se mide en ton/m<sup>2</sup>-día. Matemáticamente hablando la velocidad de extracción se define en la siguiente ecuación:

$$V(j, i) \left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right] = \frac{t(j,i)}{A(i)}$$

Donde:

- $V(j, i)$  es la velocidad de extracción para el día  $j$  del punto de extracción  $i$
- $t(j, i)$  es el tonelaje de extracción para el día  $j$  del punto de extracción  $i$
- $A(i)$  corresponde al área de influencia del punto  $i$  medido en m<sup>2</sup>.

- **Uniformidad:** Representado como el control del tiraje que ayuda a definir la regularidad de la extracción en un plan de producción. En este caso, se utiliza la uniformidad planteada por Susaeta (2004) debido a que el índice ha sido calibrado y utilizado en operaciones mineras. El índice específico de uniformidad (SUI) se plantea en la siguiente ecuación:

$$SUI = \Gamma \cdot \frac{t_p - t_{min}}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{max} - t_i)$$

Dónde:

- $\Gamma$  es el factor de normalización 99/89
- $t_p$  es el tonelaje extraído del punto p bajo análisis en un periodo específico
- $t_{min}$  es el tonelaje mínimo extraído en la vecindad del punto p (en el mismo periodo)
- $t_{max}$  es el tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto p (en el mismo periodo)
- $t_i$  es el tonelaje extraído del punto I perteneciente a la vecindad del punto p, en el mismo periodo
- $n$  es el número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto p.

Para este análisis el valor del SUI se obtiene en forma diaria para cada punto de extracción del clúster. Luego, el valor del SUI es llevado a la tabla de clasificación final en función del número de puntos inactivos (sin extracción) mostrado en la Tabla 6. El tonelaje extraído puede ser: Uniforme, Semi Uniforme o No uniforme. Susaeta calibró la clasificación del índice de uniformidad en función de dilución de un material seco. Al modificar las características del material a uno húmedo se hace necesario verificar la susceptibilidad del ingreso de barro ante la clasificación establecida. Un análisis de correlación realizado con la base de datos de El Teniente indica que la clasificación debe ser clasificada solo en las categorías “Uniforme” y “No Uniforme”, catalogando el caso “Semi” de la tabla original como “No Uniforme”.

**Tabla 6: Clasificación del índice de uniformidad, modificado de Susaeta (2004)**

		SUI				
		0 – 0.2	0.2 – 0.4	0.4 – 0.6	0.6 – 0.8	0.8 – 1
Puntos inactivos	0	Uniforme	Uniforme	Uniforme	No Uniforme	No Uniforme
	1	Uniforme	Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme
	2	Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme
	3	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme
	4	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme
	5	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme
	6	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme	No Uniforme

Si  $t(j, i)$  es el tonelaje extraído el día j del punto de extracción i; en términos de la Tabla 6, el mineral extraído en forma uniforme es asignado al valor  $u(j, i)$ . Si la extracción es aislada  $u(j, i)$  es igual a 0. A modo ejemplificativo, para evaluar el porcentaje del tonelaje extraído en forma uniforme en los últimos 30 días para un punto de extracción analizado, se plantea la siguiente ecuación:

$$U_{punto} [\%] = \frac{\sum_{j=1}^{30} u(j, i)}{\sum_{j=1}^{30} t(j, i)}$$



## 2.6 Conclusiones de antecedentes bibliográficos.

La revisión bibliográfica confirma la relevancia de los riesgos asociados a eventos de agua barro en las operaciones de Block y Panel Caving. Estos no solo constituyen un riesgo para la seguridad del personal, equipos e infraestructura, sino que también afectan negativamente el área disponible para la extracción de mineral, comprometiendo el cumplimiento del tonelaje planificado, entre otros aspectos (en PT Freeport se extrae mineral, pero a una velocidad baja).

En respuesta a las dificultades experimentadas en operaciones mineras debido al ingreso de agua barro, se han implementado una serie de medidas para mitigar esta situación. Una de las principales acciones ha sido la construcción de túneles de drenaje, diseñados para reducir tanto la acumulación de agua en la superficie como en el interior de la mina. Además, se han adoptado estrategias que garantizan un tiraje uniforme y una extracción controlada para minimizar la incidencia de este problema.

De la misma manera se han establecido sistemas de clasificación en los puntos de extracción, los cuales recopilan información clave como la cantidad de finos presentes, el nivel de humedad y el estado general del punto de extracción. Asimismo, se ha optado por la utilización de equipos telecomandados para la extracción segura en áreas donde se detecta la presencia de barro, priorizando así la seguridad del personal y la integridad de las operaciones mineras.

En el contexto de la planificación minera, en el pasado se han implementado modelos de regresión logística para evaluar el riesgo de declaraciones de agua barro. Estos modelos se han construido en base a información real que permiten cuantificar el mineral saturado remanente y/o evaluar planes mineros de largo plazo (Navia et al., 2014; Garcés et al., 2016; Castro et al., 2018; Pérez, 2021; Salas, 2022). Los estudios anteriores han determinado variables significativas para evaluar el riesgo de ingreso de agua barro, tales como:

- Altura de columna de roca primaria
- Porcentaje de columna in-situ extraída
- Porcentaje de quebrado extraído
- Zonas de acumulación de agua por depresión topográfica
- Vecinos en estado de agua barro
- Distancia a la superficie
- Flujo de agua (mensual)
- Velocidad de extracción
- Material fino contenido en el punto de extracción

Sin embargo, hasta el momento los estudios desarrollados no contemplan una metodología para evaluar el riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro en la planificación de corto plazo. La importancia de desarrollar una metodología para la planificación de corto plazo permitiría identificar zonas de alto, mediano y bajo riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro, lo que favorecería a la definición de estrategias de control y/o mitigación por zonas de riesgo.

En consecuencia, esta investigación plantea como hipótesis extrapolar la metodología de regresión logística empleada en la planificación a largo plazo para la construcción de un modelo de riesgo para eventos de agua barro en la planificación a corto plazo, incorporando variables operacionales, ambientales, topográficas y litológicas.

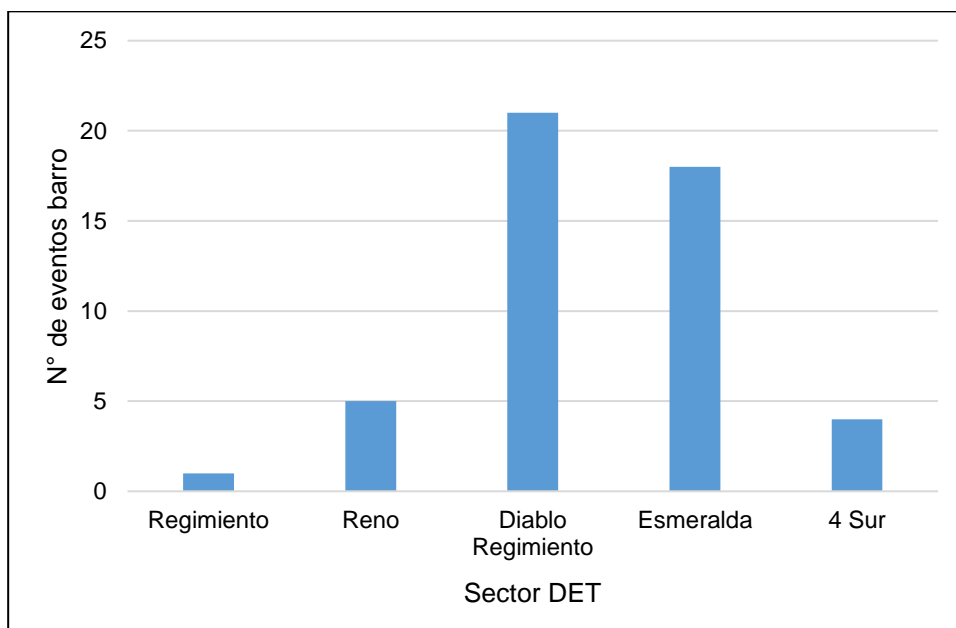
## Capítulo 3

### 3 Análisis de datos de los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda (Bloque 1 & 2)

En este capítulo, se realiza un análisis estadístico de los eventos de agua barro en los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2. Además, se dedica un subcapítulo a la simulación del flujo gravitacional, detallando el proceso y presentando los resultados obtenidos mediante el uso del software FlowSim BC v6.3 en los sectores mencionados anteriormente.

#### 3.1 Eventos de agua barro en División El Teniente (DET)

Mina El Teniente ha experimentado eventos de agua barro en varios de sus sectores, incluyendo Diablo Regimiento, Reservas Norte, Pipa Norte, Pipa Andes Sur, Esmeralda, entre otros. En la Figura 13 se observa la cantidad de eventos de agua barro ocurridos por cada sector de DET al año 2021. En donde se aprecia que los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda poseen una cantidad de eventos de agua barro considerables abarcando el 80% del total con 21 y 18 eventos, respectivamente. Los demás sectores poseen un número bajo de eventos barro, por lo cual, no se presentan las condiciones mínimas necesarias para explorar la construcción de un modelo probabilístico de eventos de agua barro.



**Figura 13: Cantidad de eventos de agua barro por sector en DET**

Por otra parte, los eventos de agua barro se han clasificado en tres tipos, considerando características claves de su comportamiento como: la magnitud de su fuerza y velocidad, distancia lineal que recorre en las galerías e infraestructuras y/o personal del trabajo. A continuación, se presentan las definiciones según División El Teniente (SGC-GRL-DET, 2017).

### ***Bombeo***

Descarga violenta de barro que se produce en la zona de influencia de un área de extracción, a través de la infraestructura existente al interior de la mina subterránea, tales como zanjas y puntos de extracción. El desplazamiento del barro cubre una superficie significativa de las labores involucradas (sobre la gradiente por distancias mayores a 20 [m] lineales de labor), interrumpiendo el proceso operacional, pudiendo ocasionar daño a la infraestructura y/o persona.

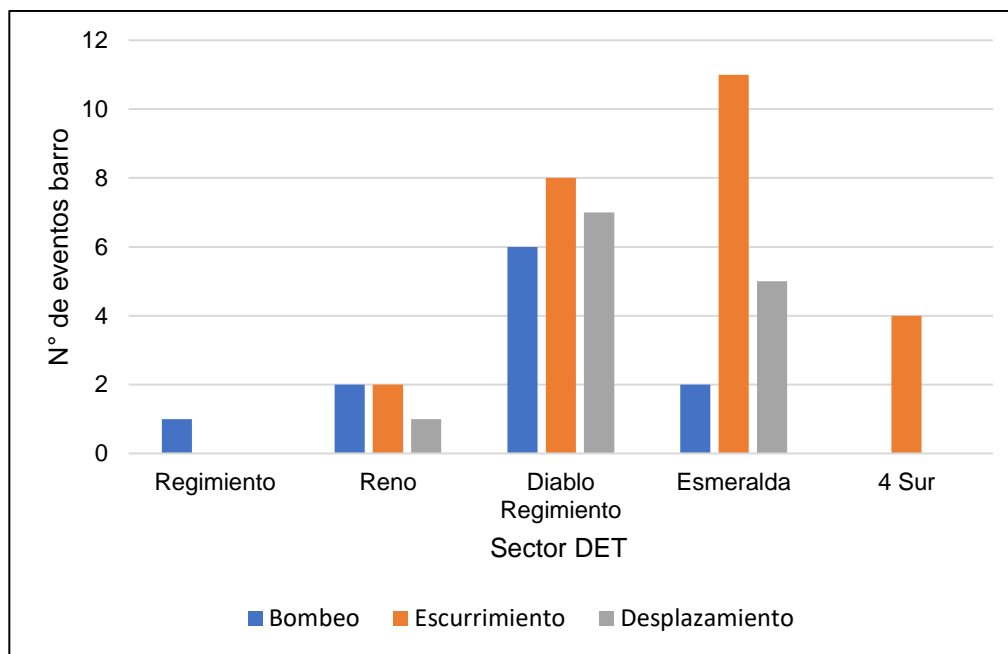
### ***Escurrimiento***

Deslizamiento de material barroso infiltrado desde los niveles superiores a través de la infraestructura existente al interior de la mina subterránea, tales como zanja, puntos de extracción, chimeneas y labores. El deslizamiento de este material barrosos se produce en forma lenta y acotada, alcanzando distancias inferiores a los 20 [m] lineales, y no afectando la infraestructura del sector.

### ***Desplazamiento***

Desplazamiento de material del talud en el punto de extracción o al interior del buzón de pique de traspaso, producto de la saturación por humedad o agua, el cual no involucra un movimiento relevante de la columna del mineral. El desplazamiento de este material puede o no proyectarse a la galería, sin sobrepasar la gradiente, su influencia es menor a un escurrimiento y no provoca interferencias significativas al proceso productivo.

En la Figura 14 se observa la distribución de los tipos de eventos por cada sector. En la mayoría de los sectores la mayor parte de estos eventos es del tipo escurrimiento, siendo de un 51% del total de eventos.



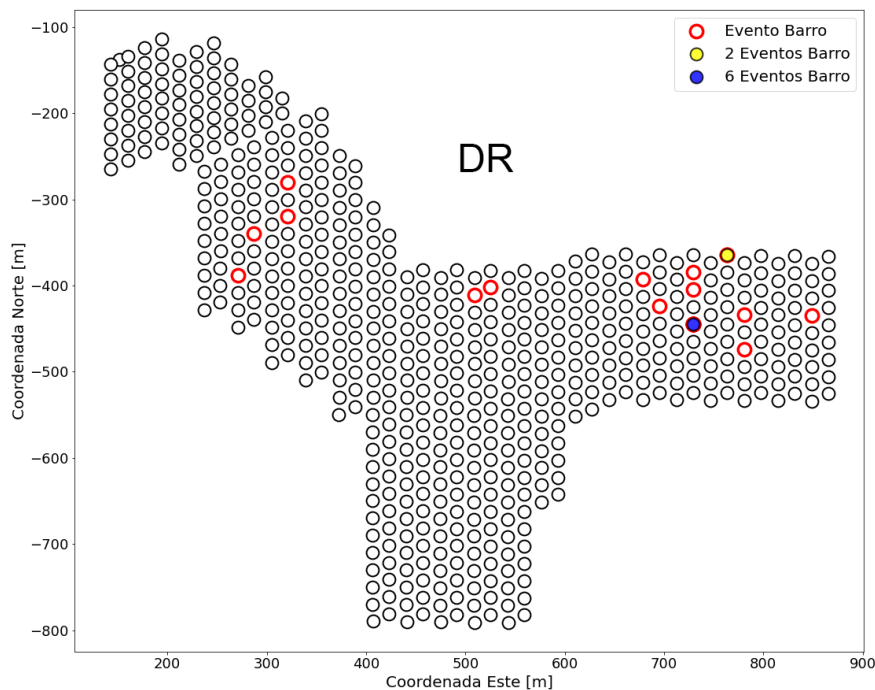
**Figura 14: Cantidad de eventos de agua barro por sector y tipo de evento**

### 3.2 Eventos de agua barro en sectores analizados

Para el desarrollo de la investigación, se consideraron los tres tipos de eventos de agua barro definidos por División El Teniente (bombeo, escurrimiento y desplazamiento). Específicamente, se analizaron dos sectores productivos: Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.

En particular, para el sector Diablo Regimiento la información analizada contiene la extracción histórica para 594 puntos de extracción (PE) desde enero de 2005 hasta agosto de 2021. En la Figura 15 se muestran los PE registrados con eventos de agua barro hasta esta fecha. Para este sector se tiene que:

- Se registraron 21 eventos de agua barro.
- 15 PE registraron eventos de agua barro.
- 6 PE registraron eventos de bombeo.
- 8 PE registraron eventos de escurrimiento.
- 7 PE registraron eventos de desplazamiento.

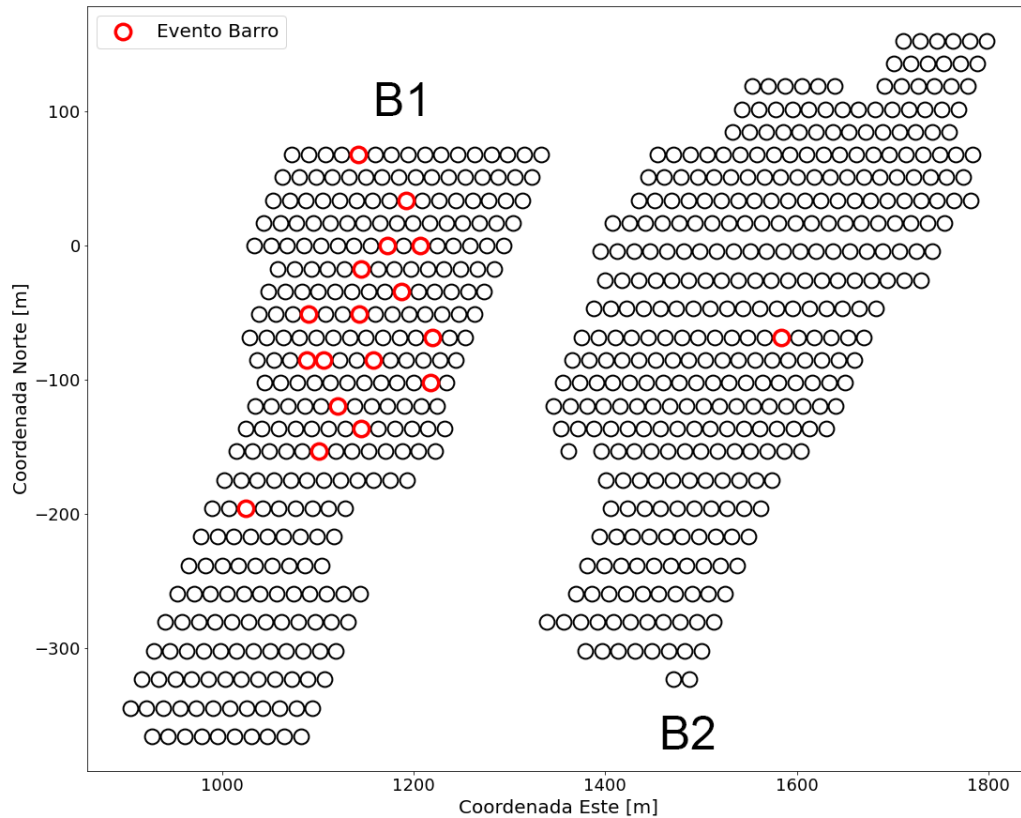


**Figura 15: Eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

Mientras que, para el sector de Esmeralda Bloque 1 (B1) y Esmeralda Bloque 2 (B2), la información analizada contiene la extracción histórica para 676 puntos de extracción (PE) desde enero de 2009 hasta agosto de 2021. En la Figura 16 se muestran los PE registrados con eventos de agua barro hasta esta fecha. Para este sector se tiene que:

- 18 PE registraron eventos de agua barro.
- 17 PE con eventos de agua barro pertenecen a B1.
- 1 PE con eventos de agua barro pertenece a B2.
- 2 PE registraron eventos de bombeo.

- 11 PE registraron eventos de escurrimiento.
- 5 PE registraron eventos de desplazamiento.



**Figura 16: Eventos de barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

En la Tabla 7 se resumen los PE analizados y los eventos de agua barro reportados para cada sector.

**Tabla 7: Eventos de agua barro registrados (Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2)**

Sector	Cantidad de PE analizados	Cantidad de eventos de barro	Tipo de evento
Diablo Regimiento	594	21 eventos (registrados en 15 PE)	6 eventos de bombeo 8 eventos de escurrimiento 7 eventos de desplazamiento
Esmeralda	676	18 eventos (registrados en 17 PE en Bloque 1 y 1 en Bloque 2)	2 eventos de bombeo 11 eventos de escurrimiento 5 eventos de desplazamiento

### 3.3 Variables consideradas en el análisis estadístico

El objetivo del análisis estadístico es evidenciar la relación entre diversas variables y los eventos de agua barro. En este contexto, se han identificado y clasificado diferentes variables en cuatro grupos, considerando sus características y su relación con la ocurrencia de eventos de agua barro:

- **Variables operacionales:** Este conjunto de variables buscan detectar cualquier desviación en el proceso de extracción que pueda propiciar la ocurrencia de eventos de agua barro.
- **Variables litológicas y fragmentación:** Este conjunto de variables tiene como propósito identificar formaciones de material fino o con características propicias para la generación de barro.
- **Variables ambientales:** Enfocadas en identificar fuentes de agua o barro que puedan aumentar el riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro.
- **Variables topográficas:** Este conjunto de variables tiene como objetivo evaluar la proximidad a fuentes potenciales de agua o barro.

A continuación, se presentan las variables consideradas en cada grupo, como muestra en la Figura 17.

Operacionales	Litologías y Fragmentación	Ambientales	Topografía
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura de columna extraída</li> <li>• Razón de extracción</li> <li>• Velocidad de extracción*</li> <li>• Uniformidad de la extracción*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de mineral primario extraído**</li> <li>• Porcentaje mineral secundario extraído**</li> <li>• Porcentaje de material quebrado extraído**</li> <li>• Porcentaje de material de talus extraído**</li> <li>• Fragmentación <math>d_{50}</math>**</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal*</li> <li>• Precipitación*</li> <li>• Vecino barro</li> <li>• Humedad de laboratorio en PE</li> <li>• Humedad observada en PE</li> <li>• Zonas de barro histórico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia a la superficie</li> <li>• Delta de distancia a la superficie</li> <li>• Zona de riesgo</li> </ul>

\*Variables evaluadas en diferentes intervalos de tiempo

\*\*Variables provenientes de FlowSim BC v6.3

Figura 17: Variables analizadas

En la Tabla 8, se presenta un resumen de las variables presentadas anteriormente.

**Tabla 8: Resumen de las variables analizadas**

<b>Variab</b> les	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Altura de columna extraída	COL	(m)	Continua	Representa la altura de columna extraída acumulada de un PE en un periodo
Fragmentación	d50	(m)	Continua	Tamaño de fragmentación estimada a través de FlowSim BC v6.3
Primario extraído en el PE	PRIM	(%)	Continua	Es el porcentaje de mineral primario extraído en el día, variable estimada por FlowSim BC v6.3
Secundario extraído en el PE	SEC	(%)	Continua	Es el porcentaje de mineral secundario extraído en el día, variable estimada por FlowSim BC v6.3
Quebrado extraído en el PE	QUE	(%)	Continua	Es el porcentaje de material quebrado extraído en el día, variable estimada por FlowSim BC v6.3
Talus extraído en el PE	TAL	(%)	Continua	Es el porcentaje de talus extraído en el día, variable estimada por FlowSim BC v6.3
Caudal Máximo, Promedio	Q	(l/s)	Continua	Representación a largo plazo de la infiltración de agua en los PE, medida en los puntos de aforo
Precipitación a 15, 30,60 días	P15, P30, P60	(mm)	Continua	Representación a largo plazo de la infiltración de agua por precipitaciones en los PE, en varios intervalos de tiempo.
Humedad observada	H_OBS	-	Cat	Humedad observada, determinada por la clasificación de DET, con valor H=0,1,2,3 o 4. (SGP-GRL-DET, 2010)
Humedad de laboratorio	H_LAB	(%)	Continua	Porcentaje de humedad del punto de extracción, medido en laboratorio.
Razón de extracción	RE	(%)	Continua	Porcentaje de la columna in-situ extraída.
Uniformidad de extracción	UNIF	(%)	Continua	Representa si la extracción del punto es uniforme en comparación con la planificada.
Velocidad de extracción entre el PE y sus vecinos	DIF_VE C	(t/m <sup>2</sup> -day)	Continua	Representa la diferencia máxima promedio de la velocidad de extracción en el clúster de los puntos vecinos
Distancia a la superficie	D_TOPO	(m)	Continua	Es la distancia que existe entre el PE y la superficie
Zona de riesgo	ZRX	-	Cat	Zona limitada por una distancia predeterminada, los PE que caigan en esta zona son (1), de lo contrario (0).
Vecino Barro	VB	-	Continua	Es el número de PE, en la vecindad de punto que han registrado eventos de agua barro

### 3.3.1 Simulación de flujo gravitacional a través de FlowSim BC v6.3

Dada la falta de mediciones continuas en terreno sobre litologías y fragmentación del mineral extraído a escala de puntos de extracción (PE) se recurre a la herramienta de simulación de flujo gravitacional, FlowSim v6.3. El objetivo es recopilar información sobre la entrada de material quebrado proveniente de sectores históricamente explotados, específicamente para los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.

Estos datos serán posteriormente utilizados para evaluar el riesgo potencial de eventos de agua barro en la zona. La hipótesis planteada sugiere que el flujo gravitacional puede desempeñar un papel significativo en la manifestación de condiciones asociadas con el agua barro.

FlowSim BC es un simulador de flujo gravitacional, y emplea el método de autómatas celulares para modelar el flujo en operaciones subterráneas con métodos de Block o Panel Caving (Castro & Trueman, 2008; Castro, et al., 2016). Ampliamente utilizado en diseño y planificación minera, FlowSim ha sido validado mediante análisis retrospectivos, experimentos físicos y marcadores a escala mina (Castro, et al., 2018; Cornejo, et al., 2020).

Como datos de entrada en la simulación de flujo gravitacional, se utiliza la siguiente información de ambos sectores:

- Modelo de bloques
- Plan de extracción
- Geometría de bateas
- Diseño y espaciamiento de puntos de extracción

A modo ejemplificativo, se muestra en la Figura 18 el modelo de bloques proporcionado por DET para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2 caracterizado por las diferentes litologías.

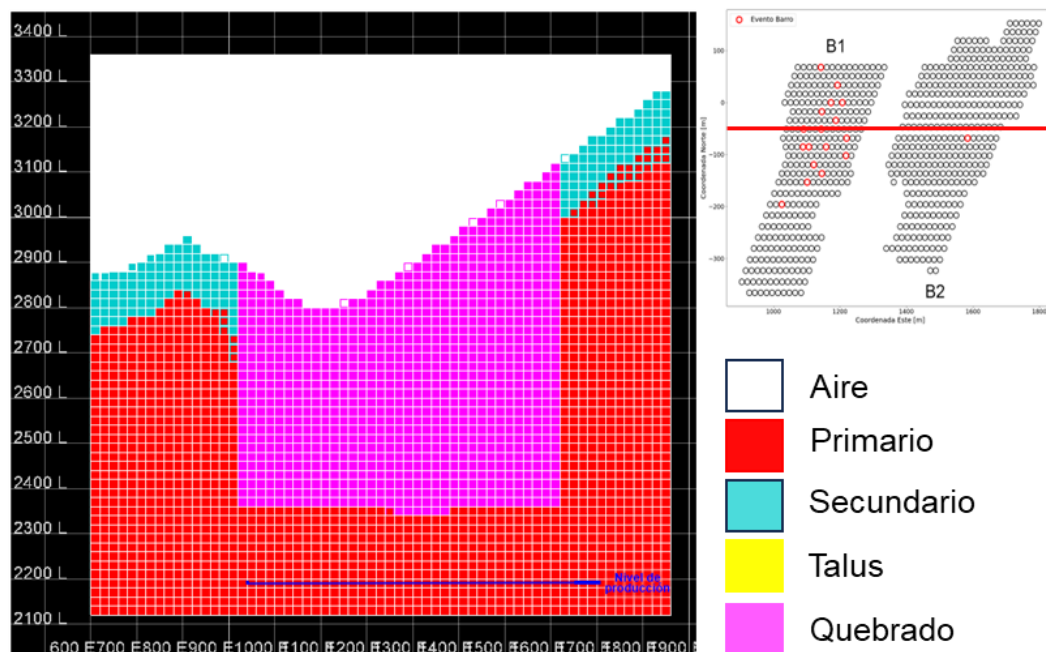
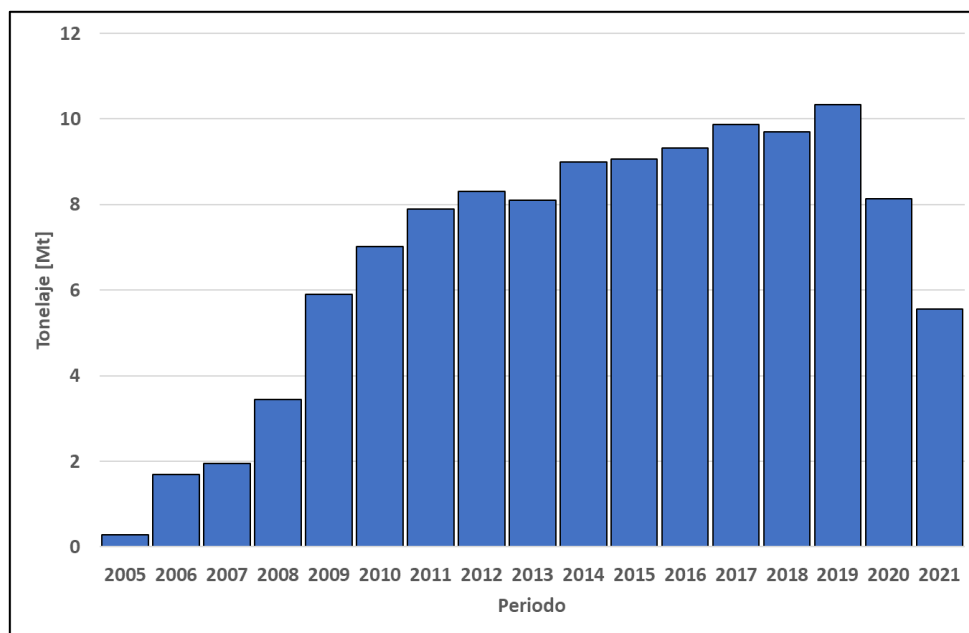


Figura 18: Modelo de Bloques Sector Esmeralda Bloque 1 & 2



De la misma manera, en la Figura 19 se muestra el plan de extracción utilizado para la simulación de flujo gravitacional de Diablo Regimiento.



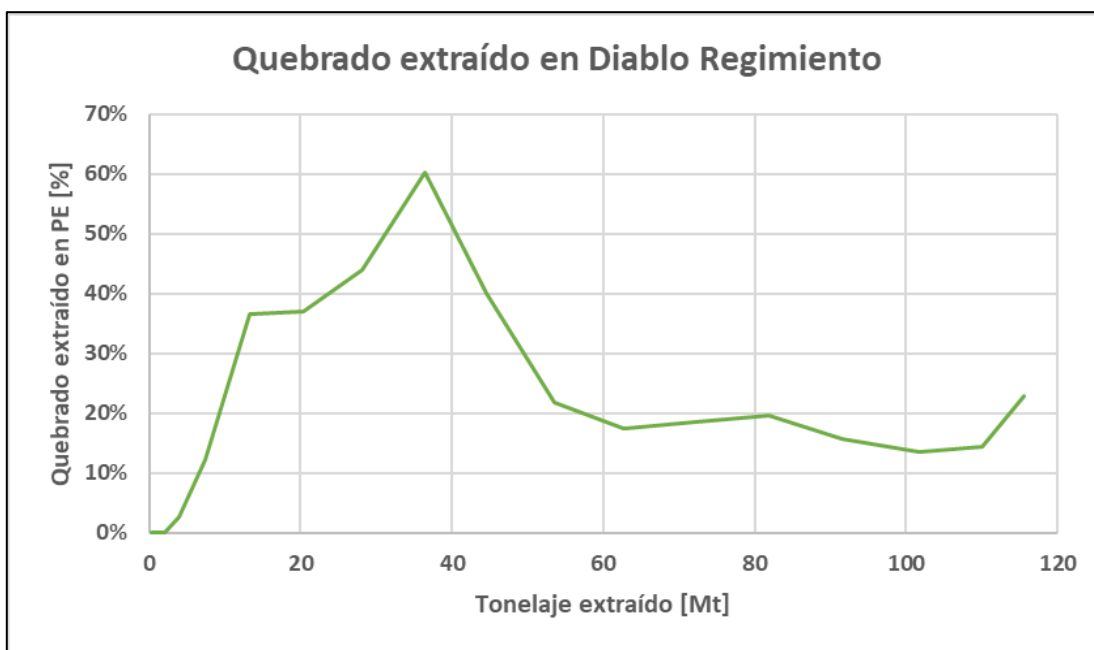
**Figura 19: Plan de extracción histórico de Diablo Regimiento**

La Tabla 9 muestra el tonelaje total a simular de ambos sectores:

**Tabla 9: Tonelaje real simulado en FlowSim BC**

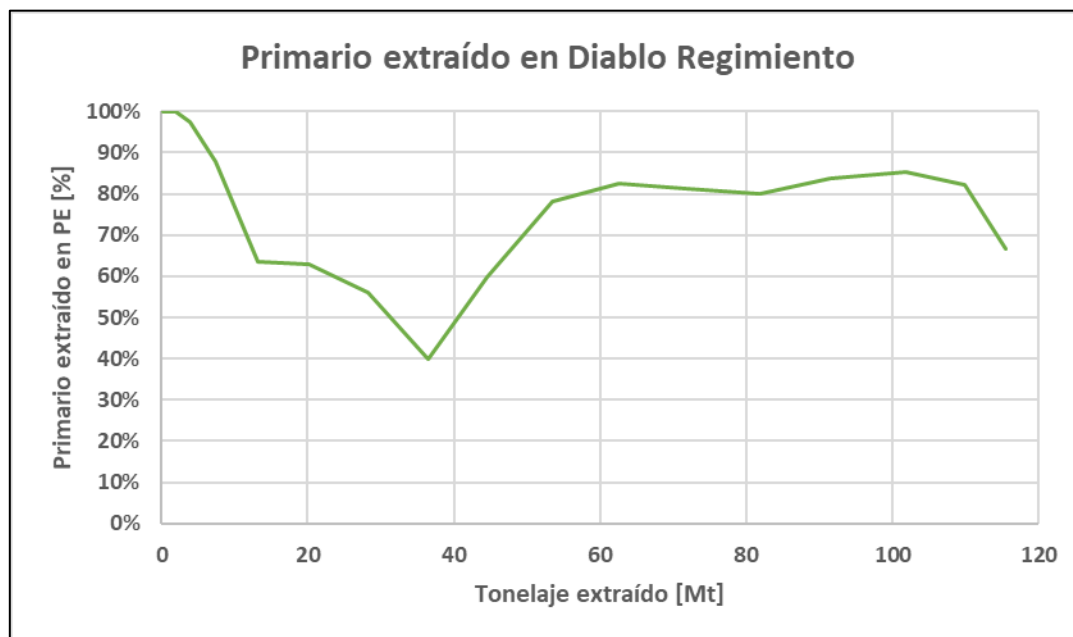
Sector	Tonelaje real (t)
Esmeralda Bloque 1 & 2	89,251,387
Diablo Regimiento	115,555,123

Basándonos en los resultados de la simulación de flujo gravitacional, la Figura 20 ilustra la cantidad de quebrado extraído desde los puntos de extracción en Diablo Regimiento. Se observa un incremento en el quebrado extraído, alcanzando su punto máximo de 60% cuando se llega a las 38 Mt del total extraído del sector. Posteriormente, se observa una disminución conforme avanza la extracción.



**Figura 20: Quebrado extraído en Diablo Regimiento**

En la Figura 21, se observa que, al inicio de la extracción, predomina la litología correspondiente al mineral primario. No obstante, a medida que avanza la extracción y aumentan las alturas de las columnas de extracción, se inicia el ingreso de material quebrado, resultando en una disminución de la proporción de mineral primario extraído. Al alcanzar aproximadamente las 40 Mt, se evidencia un aumento en el porcentaje de mineral primario, estabilizándose en un 80% del total extraído del sector sobre las 60 Mt.



**Figura 21: Primario extraído en Diablo Regimiento**

En cuanto al mineral secundario, en la Figura 22 se observa que no hay extracción hasta llegar a las 60 Mt extraídas. A pesar de esto, su porcentaje es inicialmente bajo, inferior al 2%, y alcanza su máximo aproximadamente a las 115 Mt, representando un 10% del total extraído del sector.

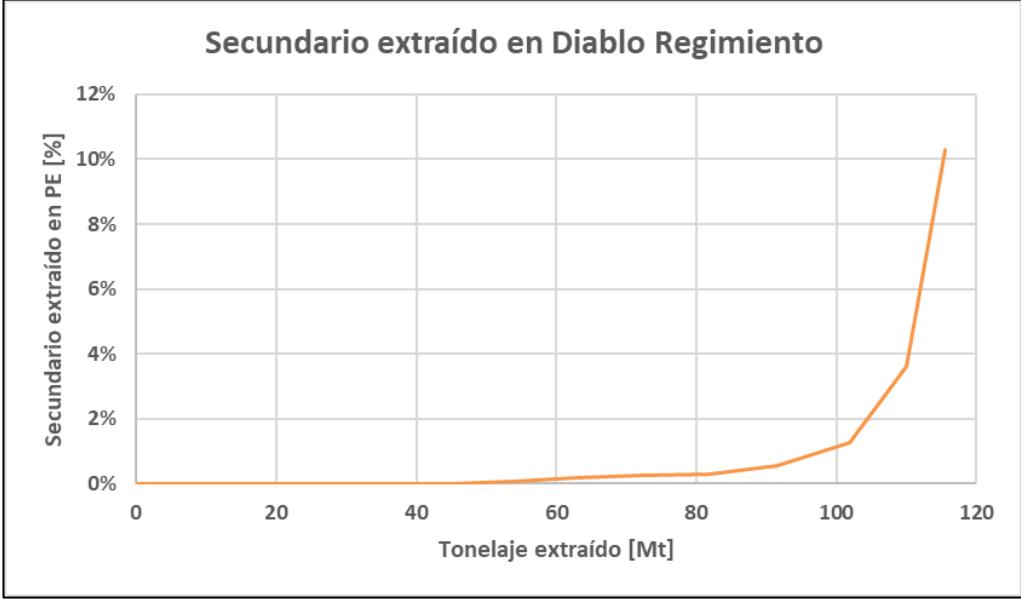


Figura 22: Secundario extraído en Diabolo Regimiento

Para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 23 muestra un aumento constante en el porcentaje de quebrado extraído, alcanzando su punto máximo de 50% de quebrado extraído al llegar a los 70 Mt.

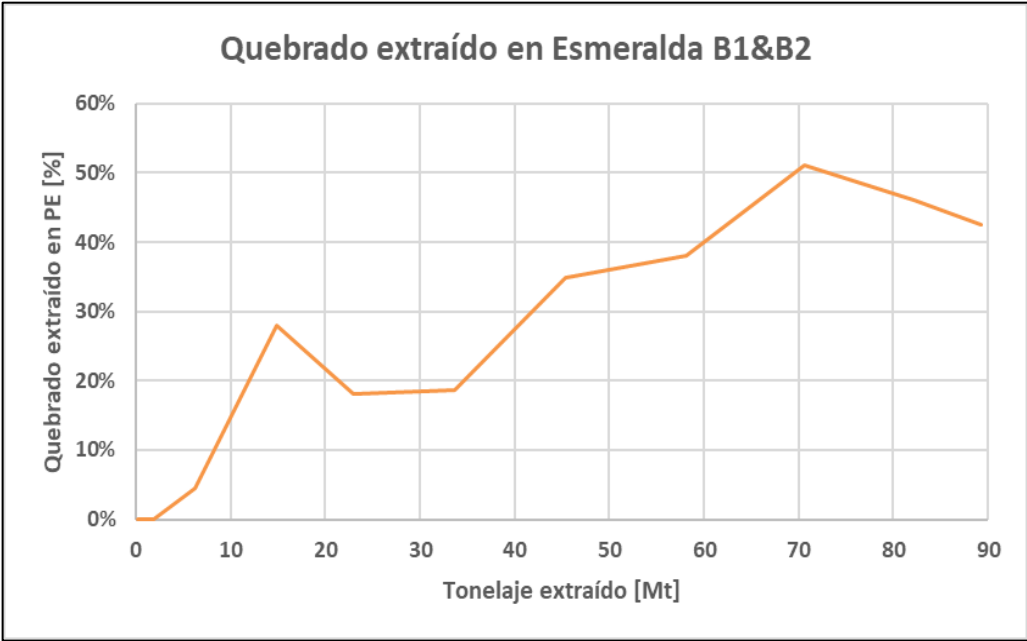
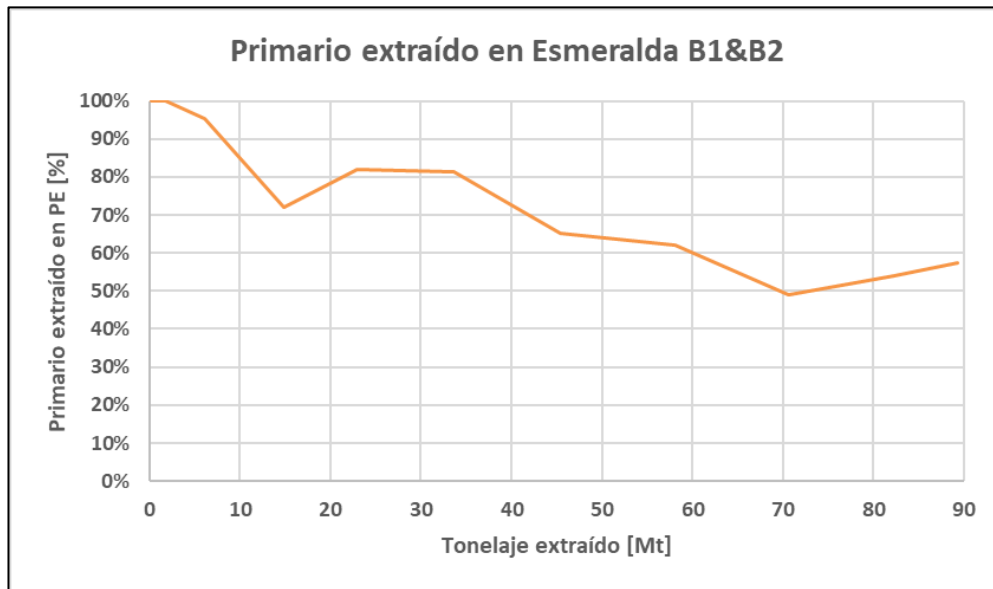


Figura 23: Quebrado extraído en Esmeralda Bloque 1 & 2

En la Figura 24 se observa que, al inicio de la extracción, predomina la litología correspondiente al mineral primario. No obstante, a medida que avanza la extracción y aumentan las alturas de las columnas de extracción, se inicia el ingreso de material quebrado, resultando en una disminución de la proporción de mineral primario extraído.



**Figura 24: Primario extraído en Esmeralda Bloque 1 & 2**

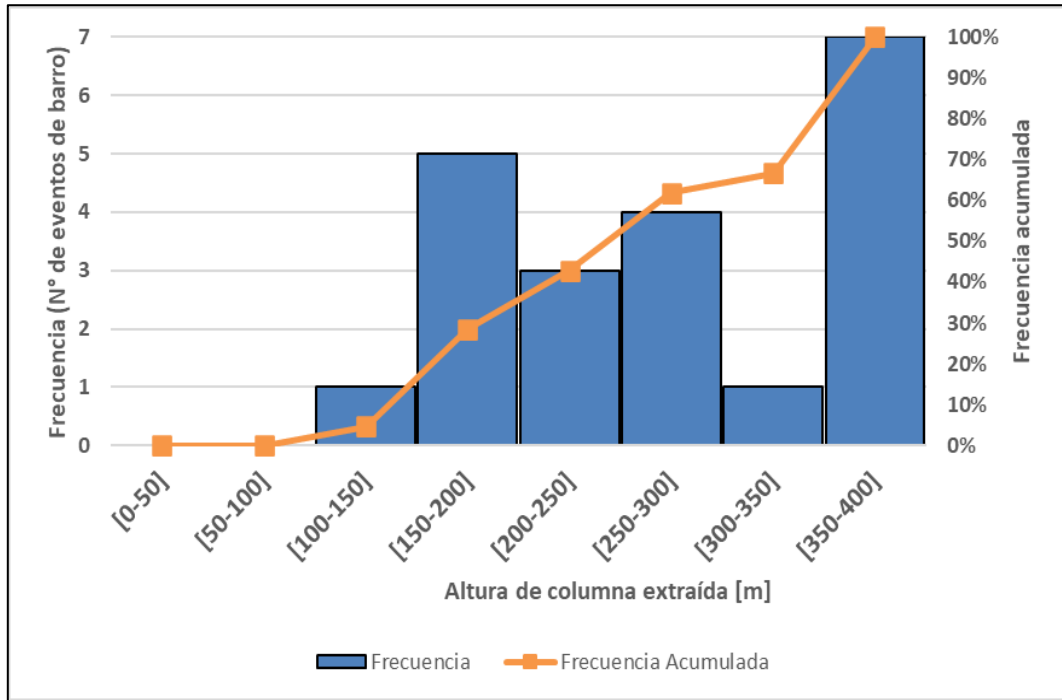
Cabe destacar, que para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, no se observa extracción de secundario y talus por puntos de extracción.

### 3.3.2 Análisis de altura de columna extraída

La altura de columna extraída representa a la cantidad de metros extraídos en la columna de un punto de extracción, considerando el tonelaje acumulado del punto al término del periodo de evaluación. Cada año, la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD) se dedica a elaborar el Plan de Negocio y Desarrollo (PND). En este proceso incluye el cálculo de las alturas de columnas económicas para cada sector de la mina sujeta a restricciones operaciones y a la ubicación del material quebrado de los sectores superiores.

En el PND 2021, para el sector Diablo Regimiento se ha establecido una altura económica promedio de 235 metros, mientras que para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2 la altura económica promedio definida es de 247 metros.

En el caso específico del sector de Diablo Regimiento, la Figura 25 muestra la distribución de las alturas de columna extraída para los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura, se infiere que el 48% de los eventos presentan una altura de columna extraída superior a los 300 metros, lo que indica que la altura de la columna excede la altura económica promedio, alcanzando así la zona de material quebrado de los sectores superiores.



**Figura 25: Distribución de altura de columna extraída para eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

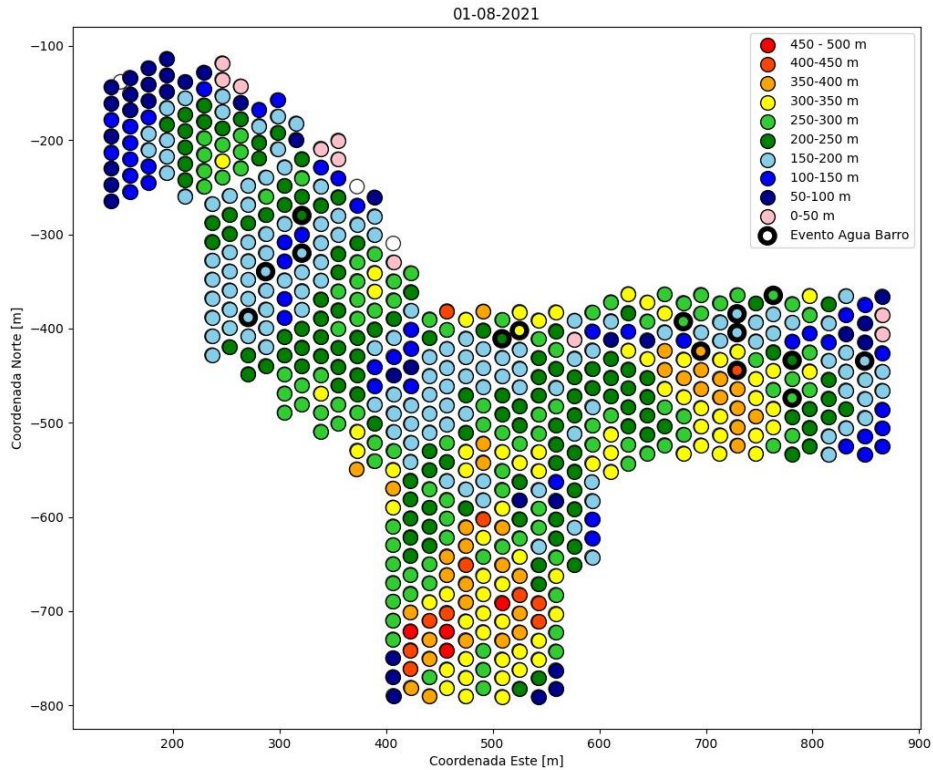
La Tabla 10 proporciona las estadísticas básicas de la altura de columna extraída en puntos de extracción (PE) durante los eventos de agua barro y en ausencia de dichos eventos. Para realizar análisis sobre los puntos de extracción (PE) sin eventos de agua barro, se emplean las métricas en los periodos cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen. Según la definición de El Teniente, un punto de extracción se considera en estado de régimen cuando alcanza el 30% de la columna in-situ extraída.

Para el caso cuando el punto de extracción registro evento de agua barro, el valor promedio de la altura de columna extraída fue de  $271 \text{ m} \pm 87 \text{ m}$ , tal como muestra la Tabla 10. Este resultado sugiere que, durante estos eventos, los PE con altas alturas de columnas podrían experimentar un aumento en el riesgo de sufrir un evento de agua barro.

**Tabla 10: Resumen con estadísticas básicas de altura de columna extraída en Diablo Regimiento**

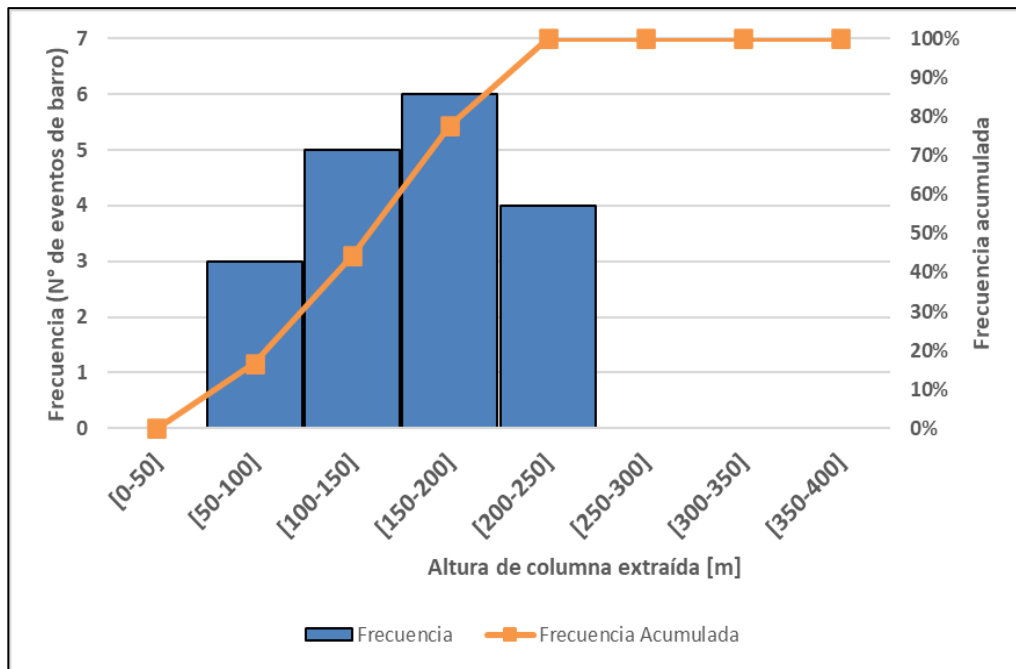
Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	271 [m]	190 [m]
Desviación estándar	87 [m]	83 [m]
Máximo	387 [m]	492 [m]
Mínimo	149 [m]	39 [m]

En la Figura 26 se muestra una vista en planta la altura de columna extraída acumulada de cada PE del sector Diablo Regimiento a Agosto del 2021.



**Figura 26: Altura de columna extraída en sector Diablos Regimiento**

Para el sector Esmeralda Bloque, la Figura 27 muestra la distribución de la altura de columna extraída para los eventos de agua barro registrados, de la cual se deduce que el 23% de los eventos presentan una altura de columna extraída superior a los 200 metros.



**Figura 27: Distribución de altura de columna extraída para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

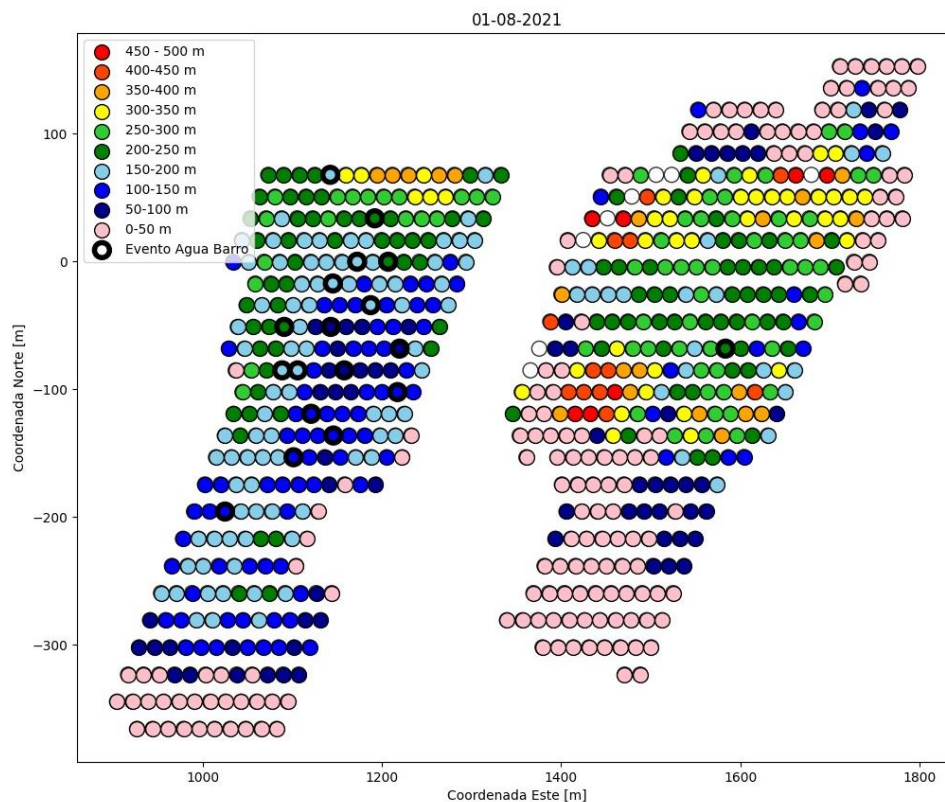
La Tabla 11 presenta las estadísticas básicas de la altura de columna extraída en puntos de extracción (PE) durante eventos de agua barro y en períodos sin tales eventos. Para efectos de análisis sobre los puntos de extracción (PE) sin eventos de agua barro, se emplean las métricas en los periodos cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen.

Durante los eventos de agua barro, según la Tabla 11, se observa un valor promedio de la altura de columna extraída de  $150 \text{ m} \pm 50 \text{ m}$ . Este hallazgo indica que, durante estos eventos, los puntos de extracción con alturas de columna más altas podrían tener un mayor riesgo de experimentar un evento de agua barro.

**Tabla 11: Resumen con estadísticas básicas de altura de columna extraída en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	150 [m]	166 [m]
Desviación estándar	50 [m]	86 [m]
Máximo	210 [m]	670 [m]
Mínimo	60 [m]	33 [m]

En la Figura 28 se muestra una vista en planta de la altura de columna extraída acumulada cada PE del sector de Esmeralda Bloque 1 & 2 a Agosto del 2021.



**Figura 28: Altura de columna extraída en sector Esmeralda Bloque 1 & 2**

### 3.3.3 Análisis de distancia a la superficie

La singularidad topográfica más relevante en superficie corresponde a lo que se denomina canalón (ver Figura 29). Esta se caracteriza por ser una depresión casi concéntrica al borde de la Pipa Braden, que capta los aportes de agua lluvia y nieve desde la ladera este de la cavidad y el borde oeste situado en la Pipa Braden (GRMD-DET, 2019).



Figura 29: Vista del canalón e intervenciones en superficie (GRMD-DET, 2019)

Dada la frecuencia de eventos de agua barro, El Teniente ha observado que estos sucesos se concentran principalmente en los sectores cercanos a la Pipa Braden (Diablo Regimiento y Esmeralda), es decir, en las proximidades del canalón. En particular, para determinar qué zonas son propensas al ingreso de agua barro, El Teniente ha elaborado el Plano de Potencial de Riesgo de Ingreso de Barro en la Cavidad de El Teniente (ver Figura 30), el cual identifica las áreas con mayor riesgo (zona roja) utilizando información topográfica, fisiográfica, registros de precipitaciones y la condición de los sectores abandonados en cotas superiores (GRMD-DET, 2019).

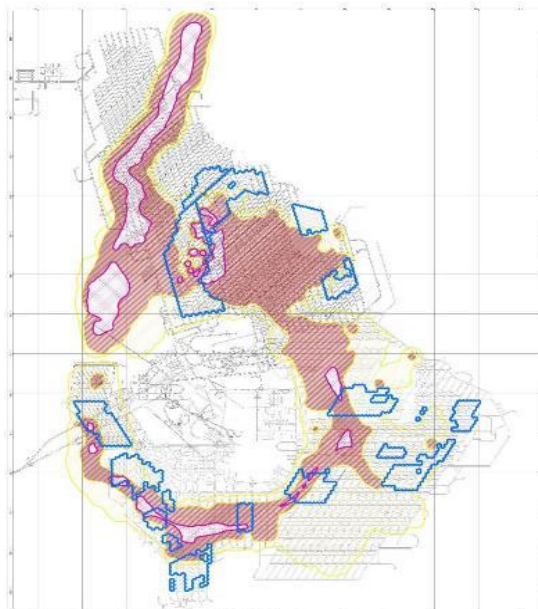
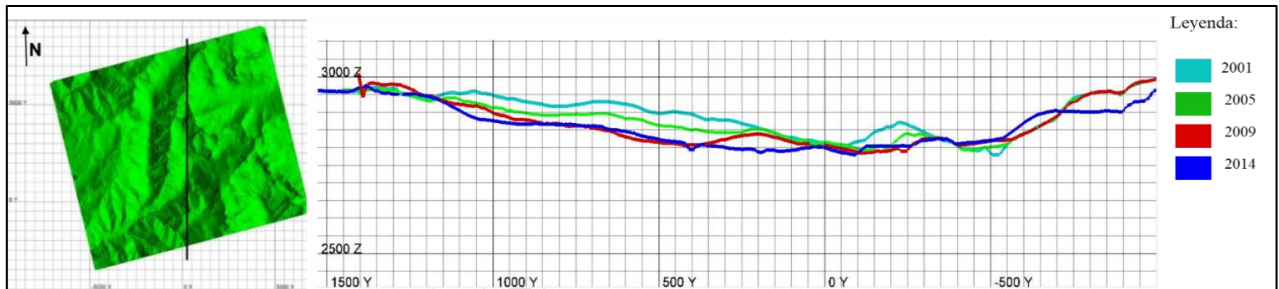


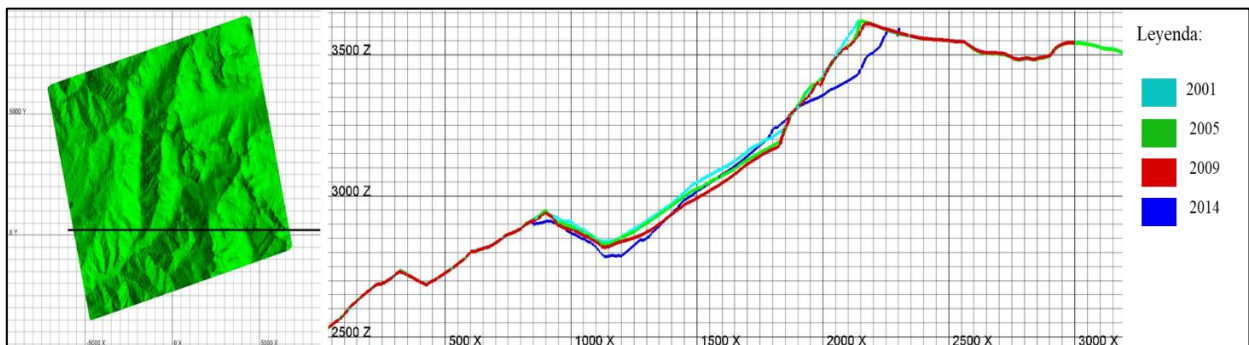
Figura 30: Plano Potencial Riesgo Ingreso Barro Cavidad el Teniente (GRMD-DET, 2019)



En función de lo anterior, para evaluar el riesgo de ingreso de agua barro dada la condición topográfica, se determina la distancia desde el PE hasta la superficie utilizando perfiles topográficos proporcionados por El Teniente, abarcando perfiles desde el año 2001 hasta el 2021. Cabe destacar, que en los años en que no se contaba con perfiles topográficos, se mantuvo el último perfil disponible. La Figura 31 y Figura 32 muestran cortes de perfiles topográficos en las direcciones Este y Norte respectivamente.



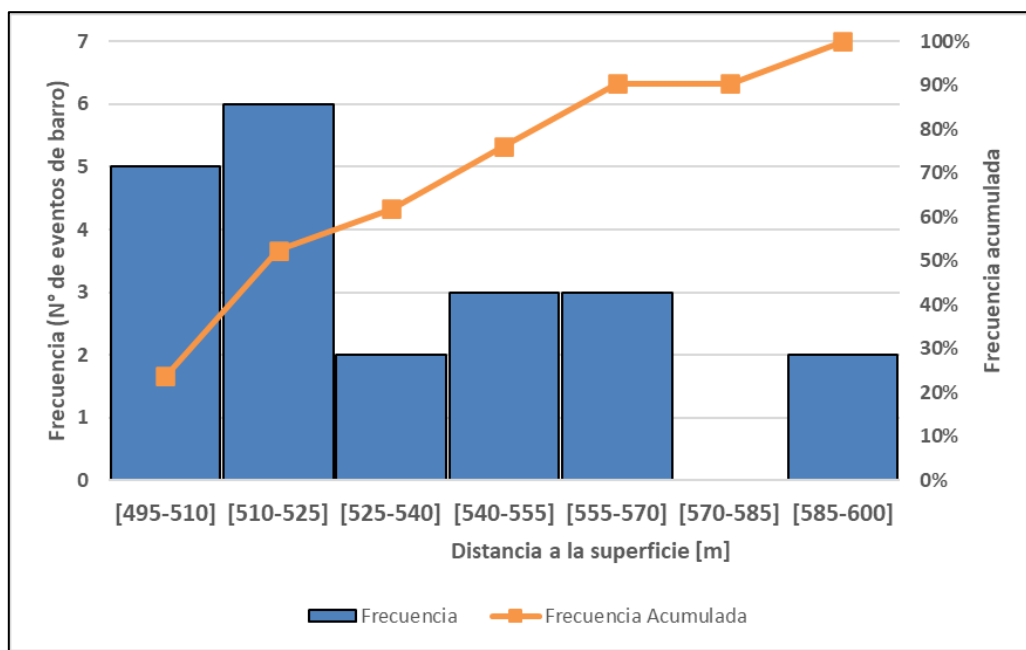
**Figura 31: Corte Perfil topográfico, cota este 1200**



**Figura 32: Corte Perfil topográfico, cota norte 200**

Tras evaluar las distancias desde cada punto de extracción hasta la superficie, se identificaron las áreas con las mayores depresiones en las zonas de Diablo Regimiento y Esmeralda. En Diablo Regimiento, la depresión más pronunciada se encuentra en la región central, con una distancia mínima de 408 metros desde el punto de extracción hasta la superficie. En Esmeralda, la mayor depresión está localizada en el Bloque 1, donde la distancia mínima desde el punto de extracción hasta la superficie es de 532 metros.

En particular, para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 33 muestra la distribución de la distancia a la superficie para los eventos de agua barro registrados. De la figura se deduce que el 52% de los eventos de agua barro ocurre con una distancia a la superficie por debajo de los 525 m.



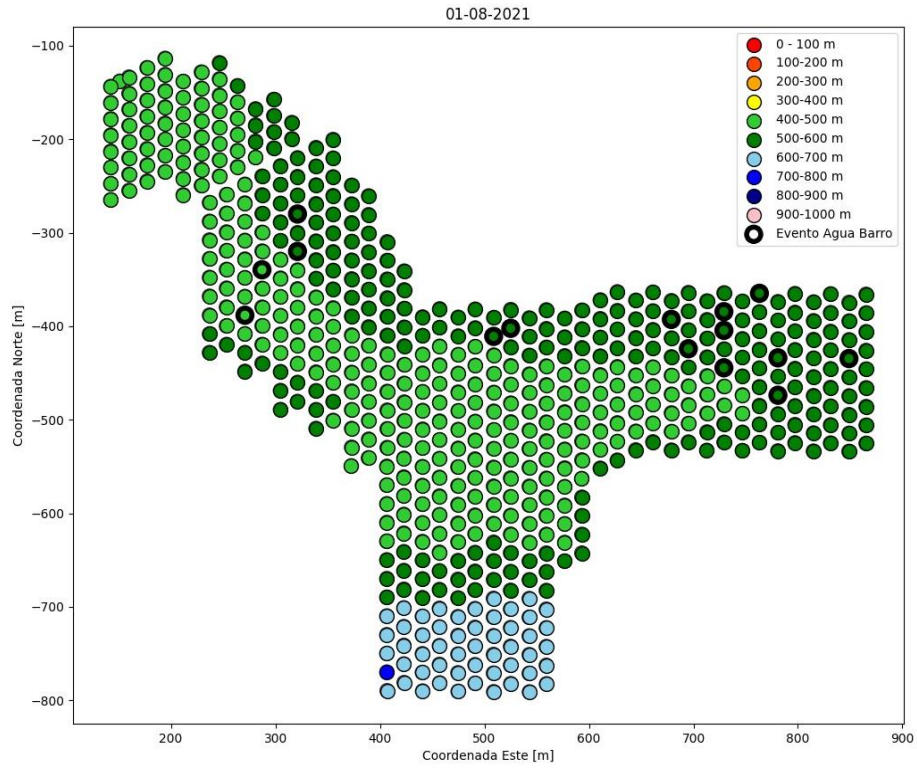
**Figura 33: Distribución de distancia a la superficie para eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

La Tabla 12 presenta las estadísticas básicas de la distancia a la superficie en los puntos de extracción (PE), tanto durante los eventos de agua barro como en su ausencia. Durante los eventos de agua barro, se observa que el valor promedio de la distancia a la superficie fue de 533 metros, con una desviación estándar de  $\pm 30$  metros.

**Tabla 12: Resumen con estadísticas básicas de distancia a la superficie en Diablo Regimiento**

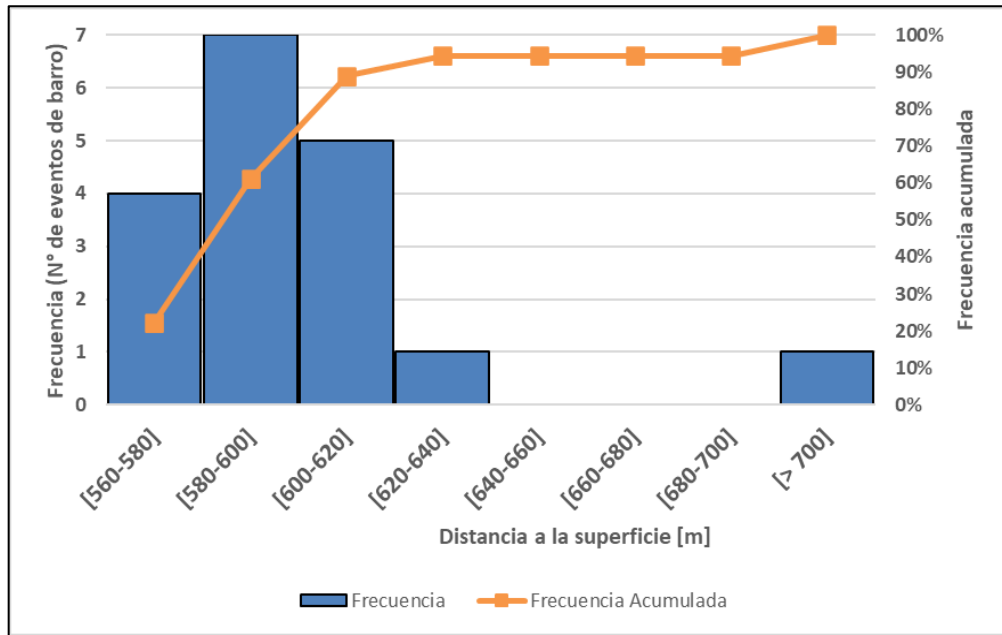
Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	533 [m]	574 [m]
Desviación estándar	30 [m]	63 [m]
Máximo	599 [m]	766 [m]
Mínimo	496 [m]	408 [m]

En la Figura 34 se muestra una vista en planta de la distancia a la superficie de cada PE del sector Diablo Regimiento a Agosto del 2021.



**Figura 34: Distancia a la superficie en sector Diablo Regimiento**

Para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 35 muestra la distribución de la distancia a la superficie para los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura se deduce que el 61% de los eventos de agua barro ocurre con una distancia a la superficie por debajo de los 600 m.



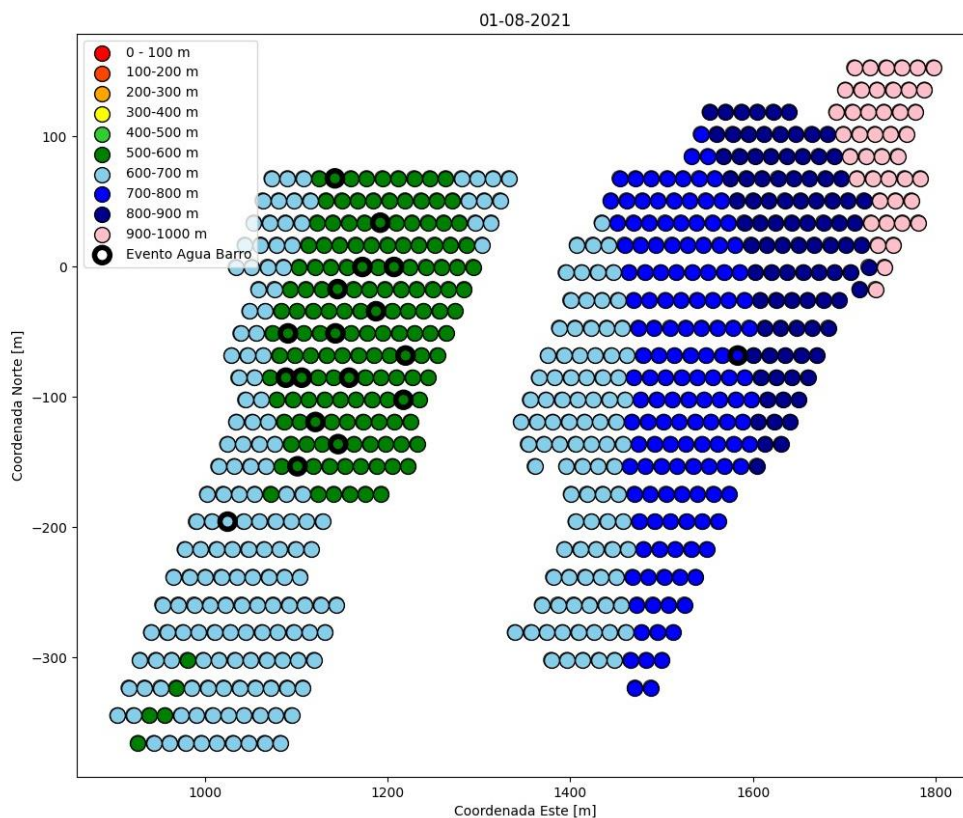
**Figura 35: Distribución de distancia a la superficie para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 13 presenta las estadísticas básicas de la distancia a la superficie en puntos de extracción (PE) durante eventos de agua barro y en períodos sin tales eventos, destacando las diferencias en la distribución de estas distancias. Durante eventos de agua barro, se observa un valor promedio de distancia a la superficie de  $606 \text{ m} \pm 52 \text{ m}$ .

**Tabla 13: Resumen con estadísticas básicas de distancia a la superficie en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	606 [m]	720 [m]
Desviación estándar	52 [m]	114 [m]
Máximo	801 [m]	1030 [m]
Mínimo	567 [m]	532 [m]

En la Figura 36 se muestra una vista en planta de la distancia a la superficie de cada PE del sector de Esmeralda Bloque 1 & 2 a Agosto del 2021.



**Figura 36: Distancia a la superficie en sector Esmeralda Bloque 1 & 2**

### 3.3.4 Porcentaje de quebrado

La explotación subterránea de la mina genera en superficie un cono de subsidencia que recibe material de derrame de las laderas y fragmentos de la Pipa Braden, por lo tanto, hay ingreso de material fino al cono de subsidencia a medida que la extracción de los sectores aumenta.

Como hipótesis, se espera que el material fino en superficie o en sectores previamente explotados migre hacia los puntos de extracción. Sin embargo, dado que DET no cuenta con registros de material fino extraído a escala de PE, se recurre a FlowSim BC v6.3 para realizar una estimación de la litología de la roca extraída en cada punto de extracción, considerando el flujo gravitacional. En este contexto, se examina el porcentaje de quebrado (material fino) extraído en el PE.

Para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 37 muestra la distribución del porcentaje de quebrado extraído en el PE para los eventos de agua barro registrados. De la figura se aprecia que, en general, los valores más altos de porcentaje de quebrado tienen una mayor frecuencia de eventos de agua barro, además se deduce de la figura que el 57% de los eventos de agua barro ocurren para un porcentaje de quebrado extraído en el PE mayor al 60%, es decir, cuando más de la mitad del material extraído corresponde a material quebrado.

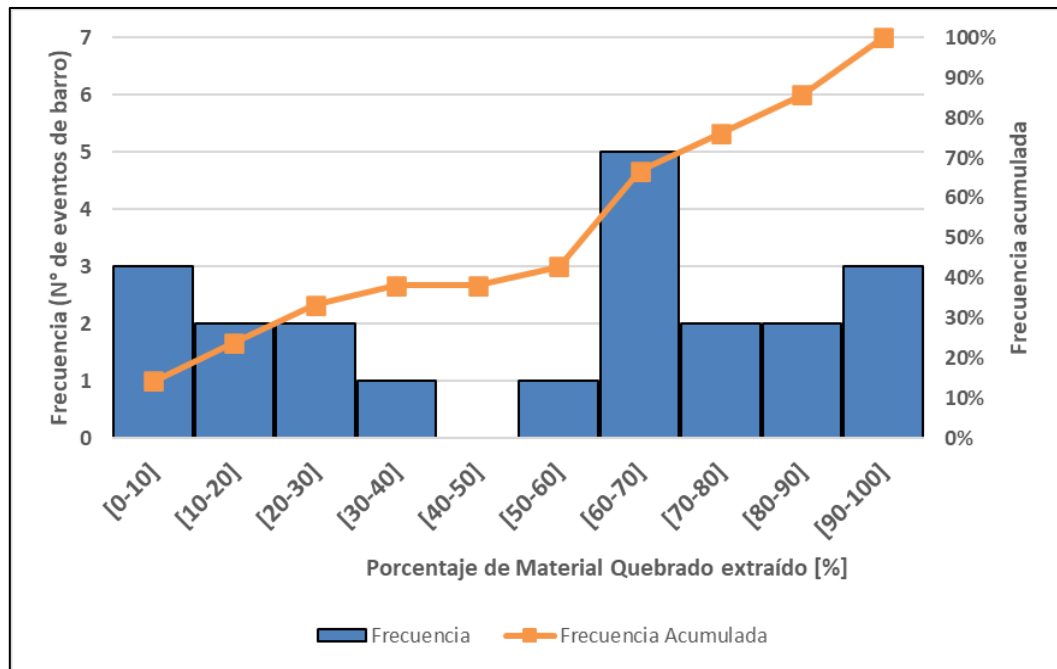


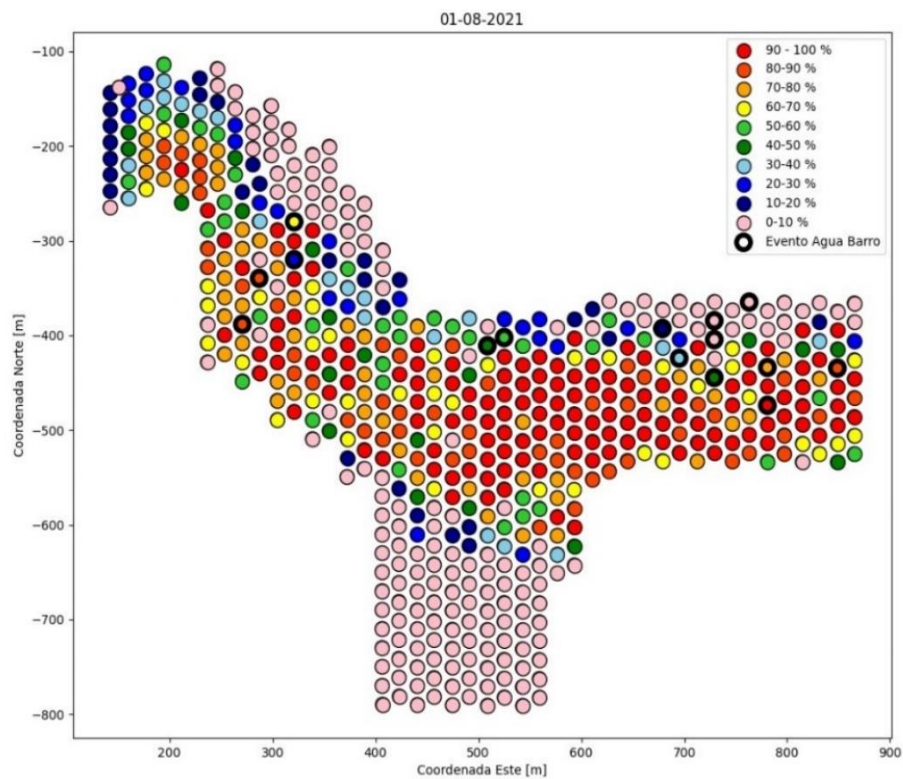
Figura 37: Distribución de Porcentaje de quebrado para eventos de agua barro en Diablo Regimiento

La Tabla 14 destaca que, durante la ocurrencia de eventos de agua barro, el porcentaje de quebrado extraído tenía un valor promedio del  $52\% \pm 33\%$ . Para realizar análisis sobre los puntos de extracción (PE) sin eventos de agua barro, se emplean los cálculos de las métricas estadísticas en los periodos cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen. A continuación, se presentan las estadísticas básicas comparativas entre PE con eventos de agua barro y PE sin tales eventos:

**Tabla 14: Resumen con estadísticas básicas de porcentaje de quebrado en Diablo Regimiento**

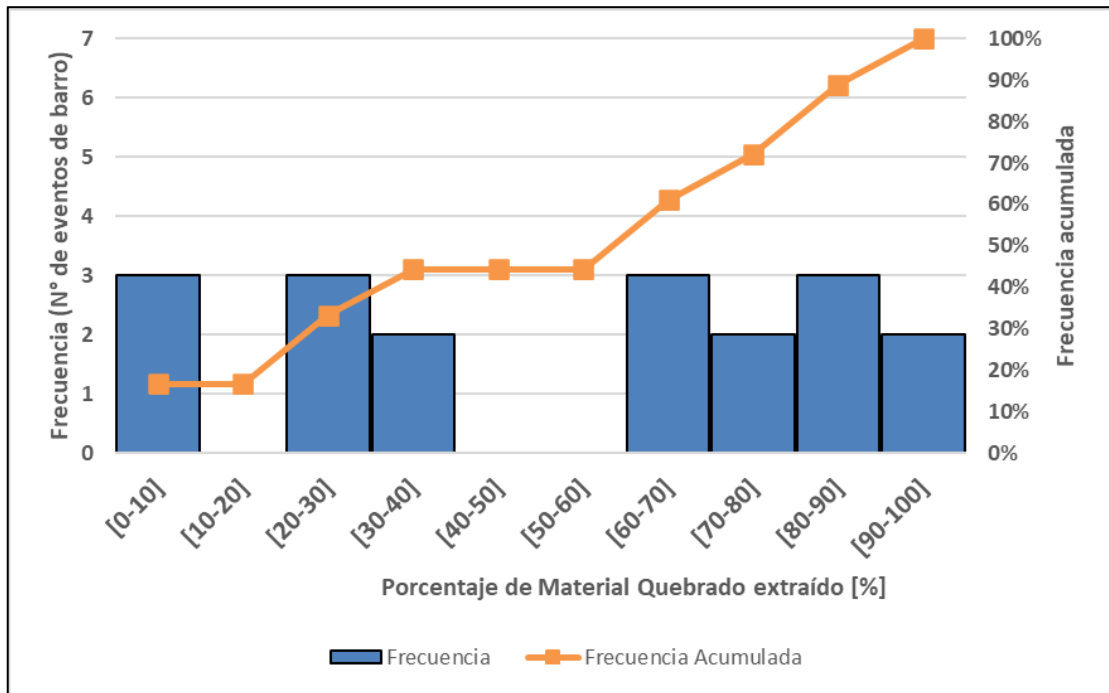
Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	52 %	42 %
Desviación estándar	33 %	38 %
Máximo	100 %	100 %
Mínimo	0 %	0 %

En la Figura 38 se muestra una vista en planta del porcentaje de quebrado de cada PE del sector de Diablo Regimiento a Agosto del 2021.



**Figura 38: Porcentaje de quebrado en sector Diablo Regimiento**

Para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 39 muestra la distribución del porcentaje de quebrado extraído en el PE para los eventos de agua barro registrados. De acuerdo con la figura, se observa que existen frecuencias similares para varios intervalos de porcentaje de quebrado extraído. Sin embargo, destaca el hecho de que 15 eventos de agua barro presentan un porcentaje de quebrado extraído superior al 20%.



**Figura 39: Distribución de porcentaje de quebrado para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 15 refleja que, en el momento de los eventos de agua barro, el porcentaje de quebrado extraído en el punto de extracción (PE) tenía un promedio del  $53\% \pm 34\%$ . A continuación, se presentan las estadísticas básicas comparativas entre PE con eventos de agua barro y PE sin tales eventos en el sector ES:

**Tabla 15: Resumen con estadísticas básicas de porcentaje de quebrado en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	53 %	46 %
Desviación estándar	34 %	31 %
Máximo	100 %	100 %
Mínimo	0 %	0 %

En la Figura 40 se muestra una vista en planta del porcentaje de quebrado de cada PE del sector de Esmeralda Bloque 1 & 2 a Agosto del 2021.

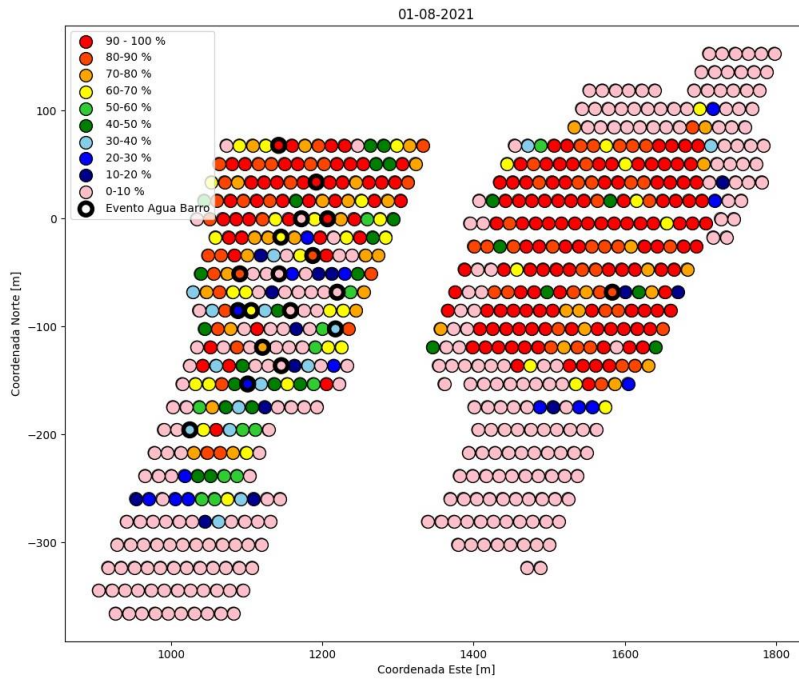


Figura 40: Porcentaje de quebrado en sector Esmeralda Bloque 1 & 2

### 3.3.5 Humedad de laboratorio

En el contexto de la humedad de laboratorio a escala de puntos de extracción (PE), esta variable ofrece información crucial sobre las condiciones del material extraído. En particular, para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 41 muestra la distribución de las mediciones de humedad de laboratorio en la fecha de ocurrencia de los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura, se puede inferir que el 89% de los eventos de agua barro se producen cuando la humedad de laboratorio es superior al 10%.

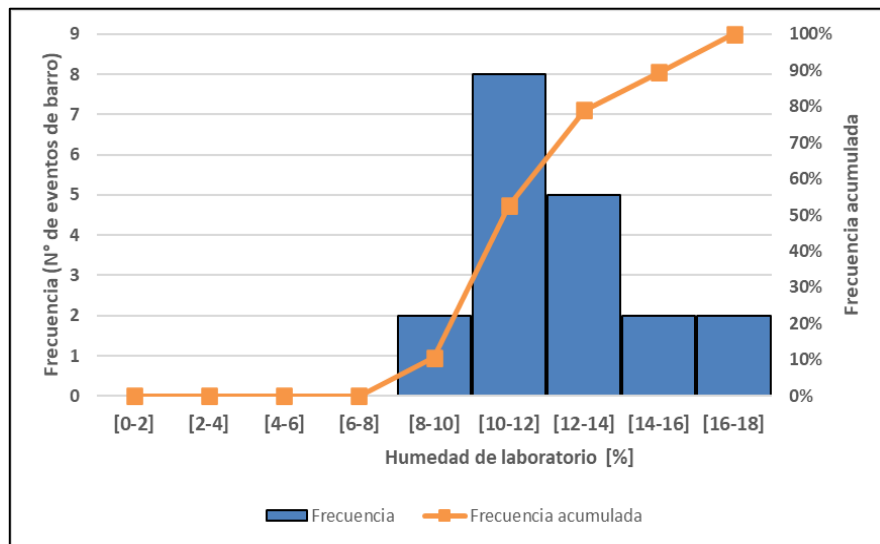


Figura 41: Distribución de humedad de laboratorio para eventos de agua barro en Diablo Regimiento.

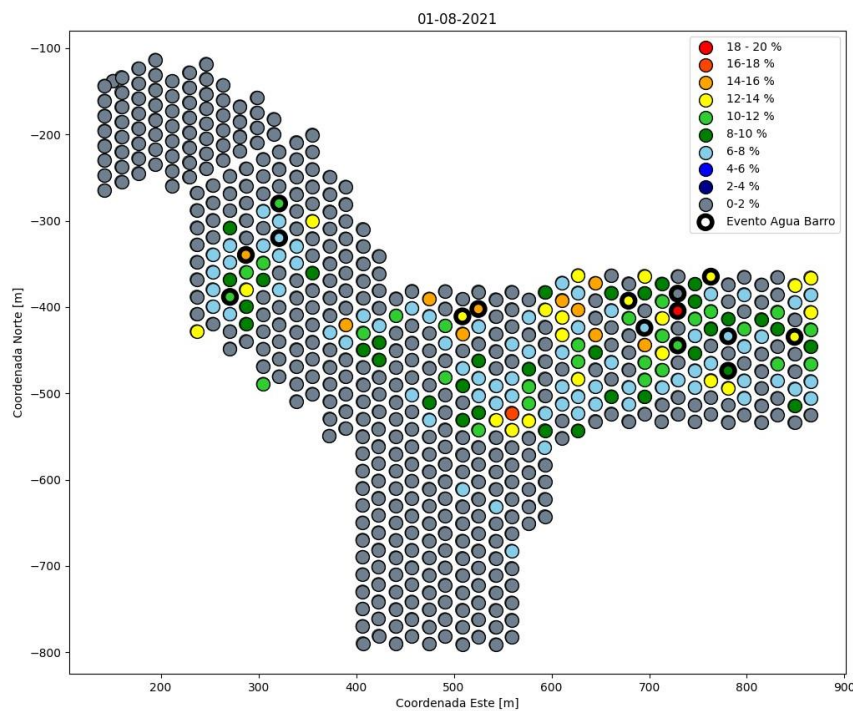


La Tabla 16 proporciona las estadísticas básicas de las mediciones de humedad de laboratorio post eventos de agua barro. En este contexto, se destaca que, al ocurrir estos eventos, el promedio de la humedad de laboratorio se situó en el  $11\% \pm 4.5\%$ .

**Tabla 16: Resumen con estadísticas básicas de humedad de laboratorio en Diablo Regimiento**

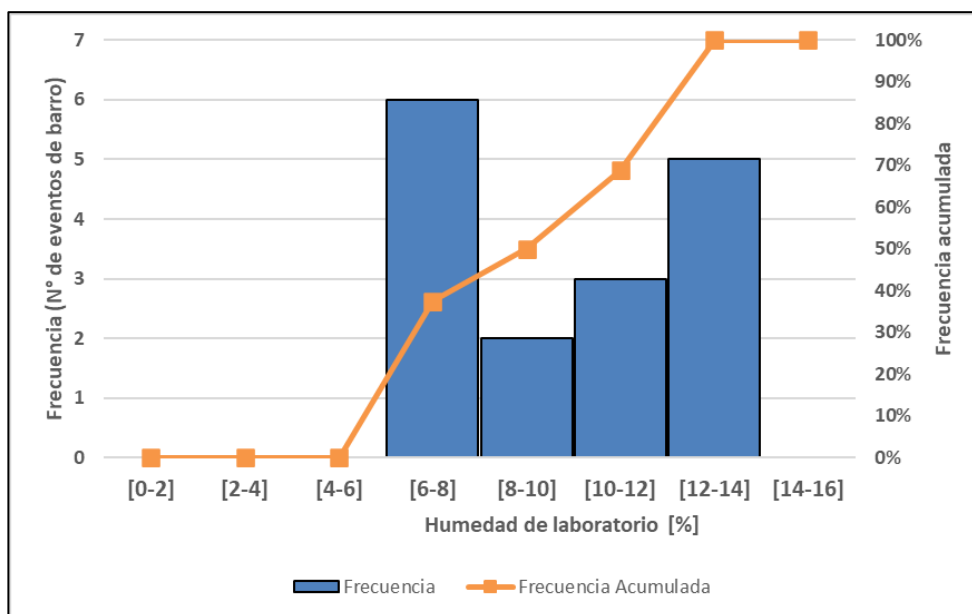
Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	11 %	1.1 %
Desviación estándar	4.5 %	3.1 %
Máximo	17.3 %	18 %
Mínimo	8.3 %	0 %

En la Figura 42 se muestra una vista en planta del porcentaje de humedad de laboratorio a escala de PE del sector de Diablo Regimiento a Agosto del 2021.



**Figura 42: Porcentaje de humedad de laboratorio en sector Diablo Regimiento**

Para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 43 muestra la distribución de la humedad de laboratorio posterior a la fecha de ocurrencia de eventos de agua barro. A partir de la figura, se deduce que el 50% de estos eventos se produce con una humedad de laboratorio superior al 10%.



**Figura 43: Distribución de humedad de laboratorio para eventos de barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 17 proporciona las estadísticas básicas de la humedad de laboratorio post eventos de agua barro. En este contexto, se destaca que, al ocurrir estos eventos, el promedio de la humedad de laboratorio se situó en el  $9\% \pm 4\%$ .

**Tabla 17: Resumen con estadísticas básicas de humedad de laboratorio en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	9 %	0.3 %
Desviación estándar	4 %	1.6 %
Máximo	13.6 %	19.2 %
Mínimo	6.6 %	0 %

En la Figura 44 se muestra una vista en planta del porcentaje de humedad de laboratorio a escala de PE del sector de Esmeralda Bloque 1 & 2 a Agosto del 2021.

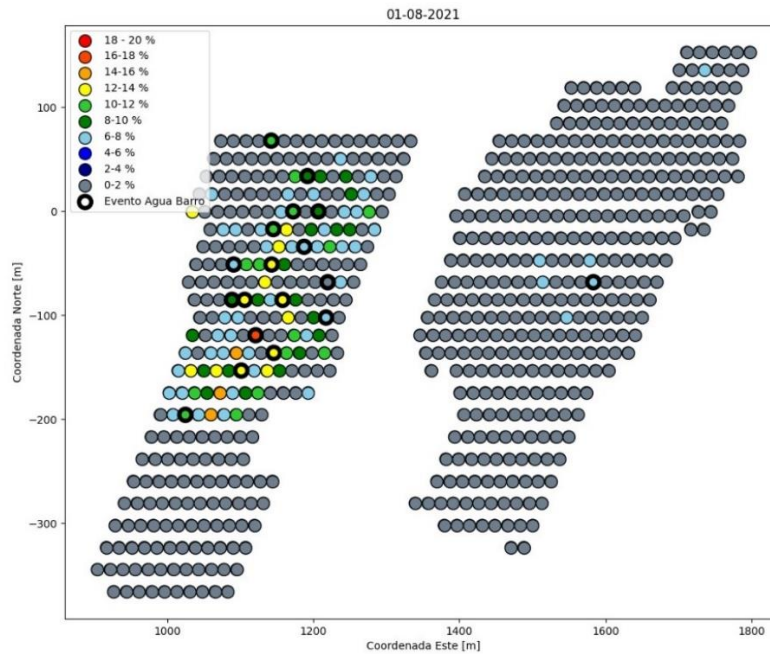


Figura 44: Porcentaje de humedad de laboratorio en sector Esmeralda Bloque 1 & 2

### 3.3.6 Análisis uniformidad de extracción

Para cuantificar la regularidad de la extracción en un sector, se utiliza el índice de uniformidad propuesto por Susaeta, como se detalla en la sección 2.5 anteriormente mencionada. Para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 45 muestra la distribución de la uniformidad para los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura se infiere que el 62% de los eventos de agua barro ocurre con una uniformidad menor al 30%, lo cual indicaría que la mayoría de estos PE presentaban una extracción no uniforme.

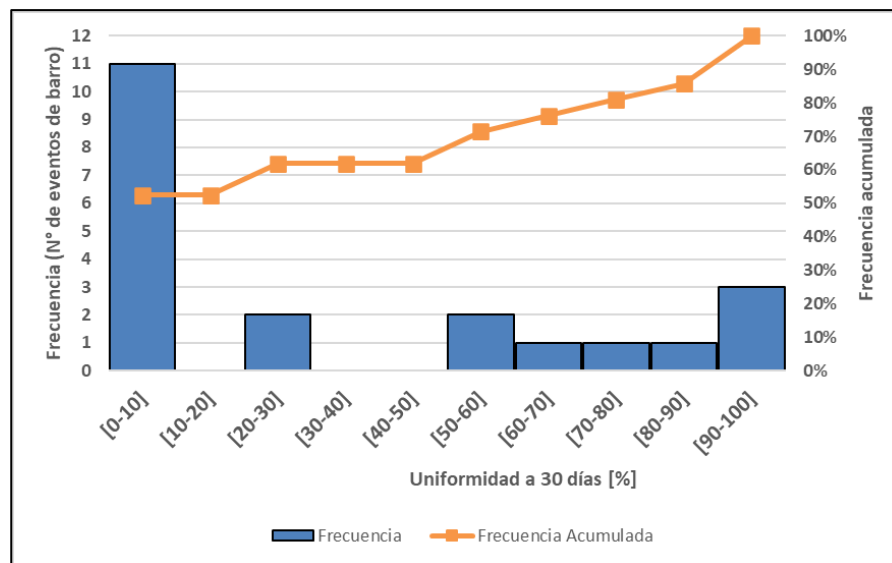


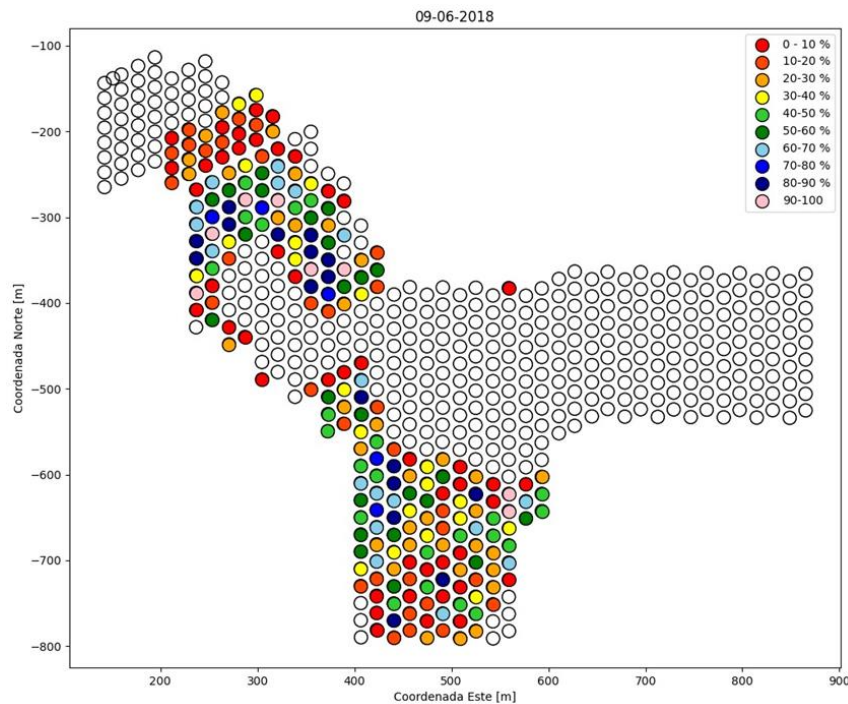
Figura 45: Distribución de uniformidad para eventos de agua barro en Diablo Regimiento

La Tabla 18 revela que durante la ocurrencia de eventos de agua barro, la uniformidad promedio se situaba en el  $34\% \pm 40\%$ . Para realizar análisis sobre los puntos de extracción (PE) sin eventos de agua barro, se emplean las métricas en los periodos cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen. A modo de resumen, se presenta un análisis de estadísticas básicas sobre la uniformidad en Diablo Regimiento.

**Tabla 18: Resumen con estadísticas básicas de uniformidad en Diablo Regimiento**

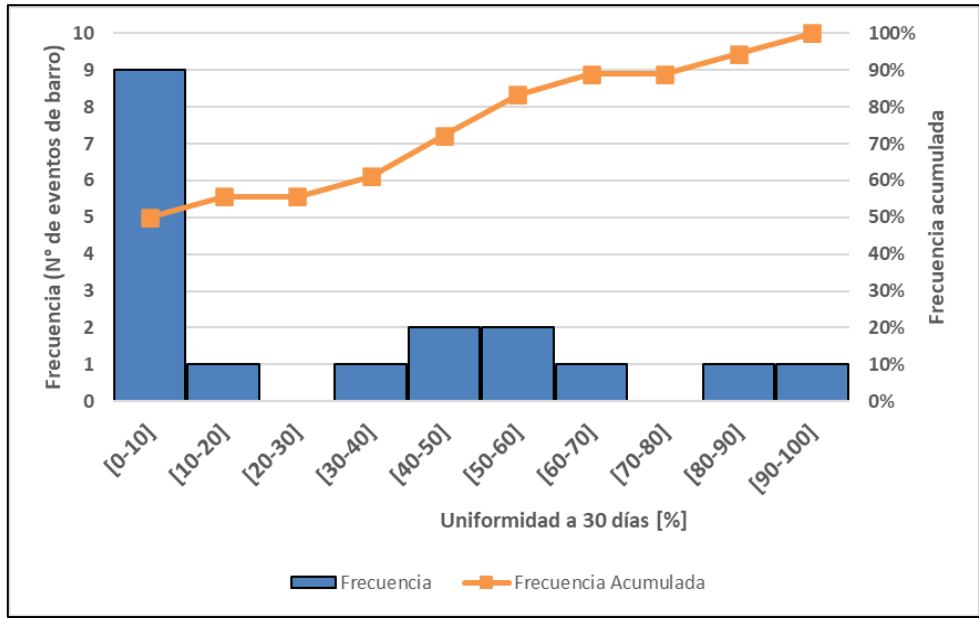
Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	34%	36%
Desviación estándar	40%	34%
Máximo	100 %	100 %
Mínimo	0 %	0 %

En la Figura 46 se muestra una vista en planta la uniformidad de la extracción escala de PE del sector Diablo Regimiento a Junio del 2018.



**Figura 46: Uniformidad a escala de punto de extracción en sector Diablo Regimiento**

Para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 47 muestra la distribución de la uniformidad para los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura se deduce que el 44% de los eventos de agua barro ocurre con una uniformidad menor al 30%, lo cual indicaría que gran parte de estos PE presentaban una extracción no uniforme.



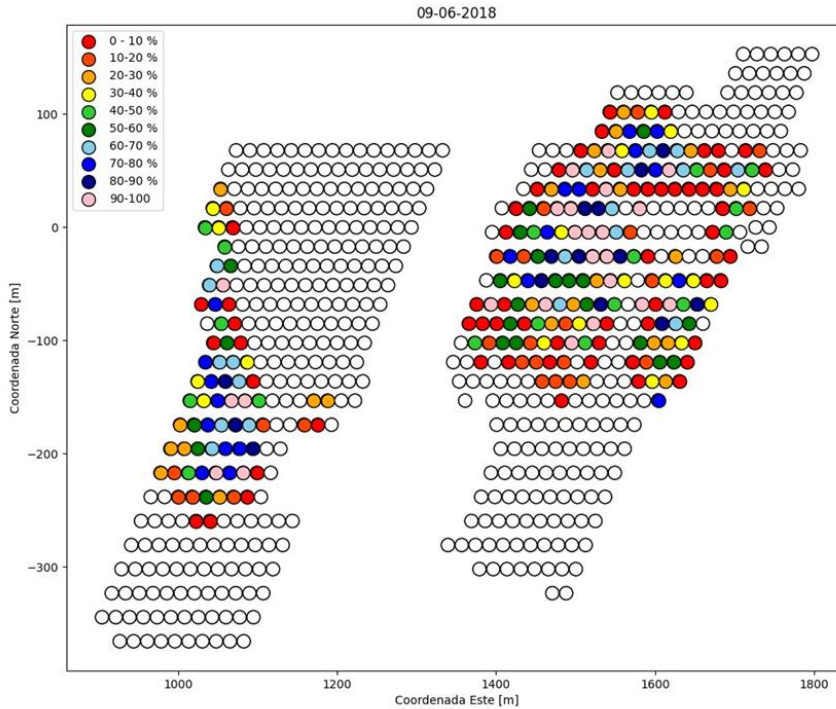
**Figura 47: Distribución de Uniformidad para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 19 muestra que, al momento de ocurrir los eventos de agua barro, el valor promedio para la uniformidad era de  $29\% \pm 33\%$ , lo que significa que contar con una extracción no uniforme, podría incrementar el riesgo de un evento de agua barro.

**Tabla 19: Resumen con estadísticas básicas de uniformidad en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	29%	35%
Desviación estándar	33%	34%
Máximo	100 %	100 %
Mínimo	0 %	0 %

En la Figura 48 se muestra una vista en planta la uniformidad de la extracción escala de PE del sector Esmeralda Bloque 1 & 2 a Junio del 2018.

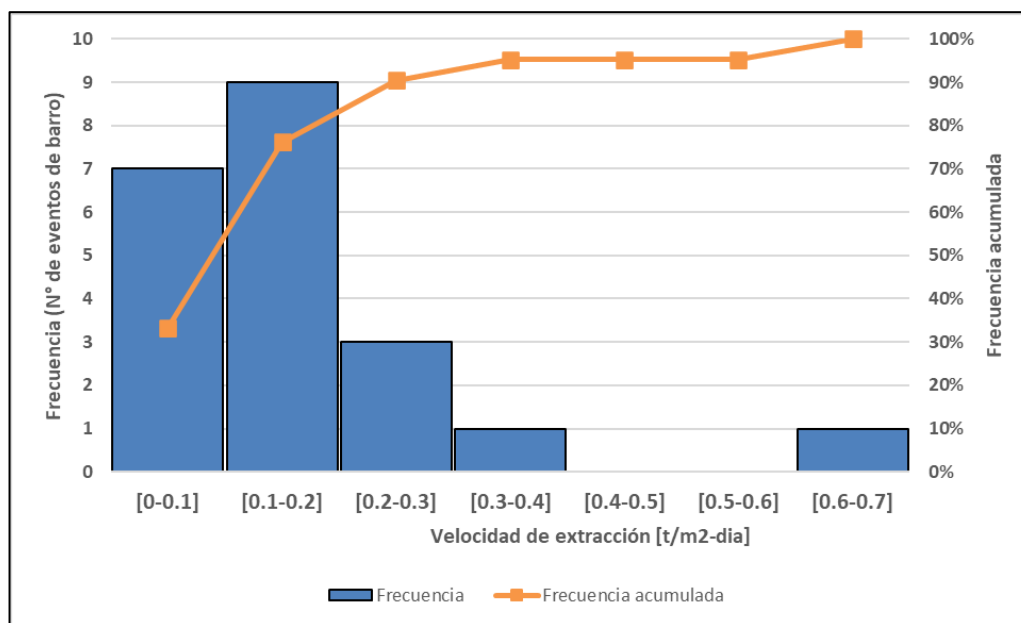


**Figura 48: Uniformidad a escala de punto de extracción en sector Esmeralda Bloque 1 & 2**

### 3.3.7 Velocidad de Extracción

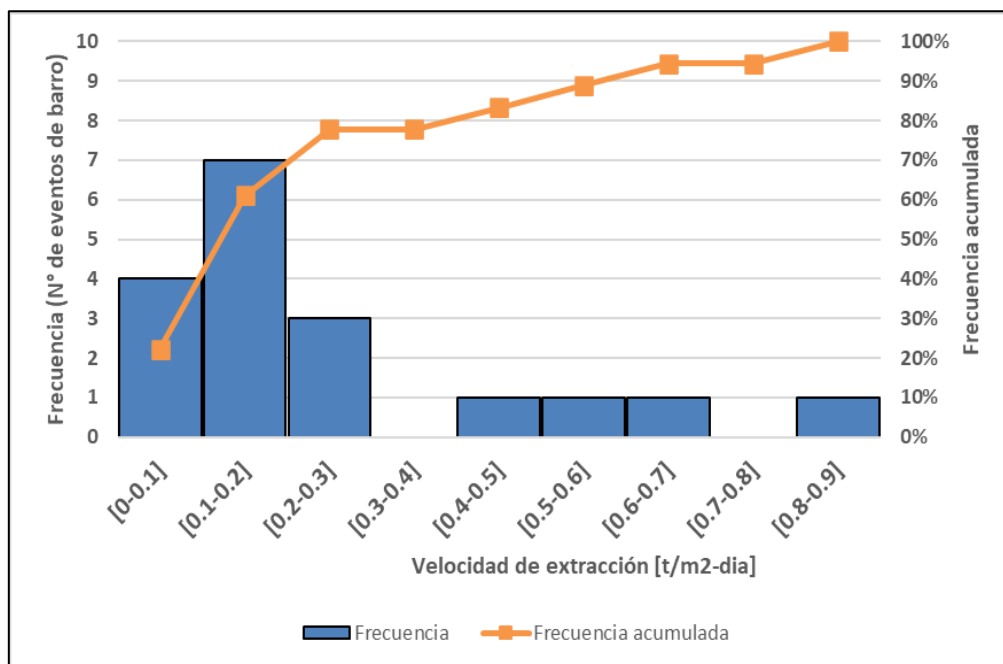
Otro indicador clave del control de la extracción es la velocidad de extracción, que representa la velocidad con la que se extrae el material de un punto específico y se mide en toneladas por metro cuadrado por día ( $t/m^2$ -día). En investigaciones anteriores realizadas por el grupo operacional de barro de la mina El Teniente se han encontrado desviaciones en las velocidades planificadas en zonas de control, lo que sugiere la hipótesis de que un aumento en las velocidades de extracción podría generar un mayor riesgo de ocurrencia de eventos (GRMD-DET, 2019).

En particular, para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 49 exhibe la distribución de la velocidad de extracción 30 días antes de la fecha de ocurrencia de los eventos de agua barro. A partir de la figura, se puede inferir que la mayoría de los eventos ocurren con velocidades de extracción bajas, lo cual contradice la hipótesis planteada.



**Figura 49: Distribución de velocidad de extracción para eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

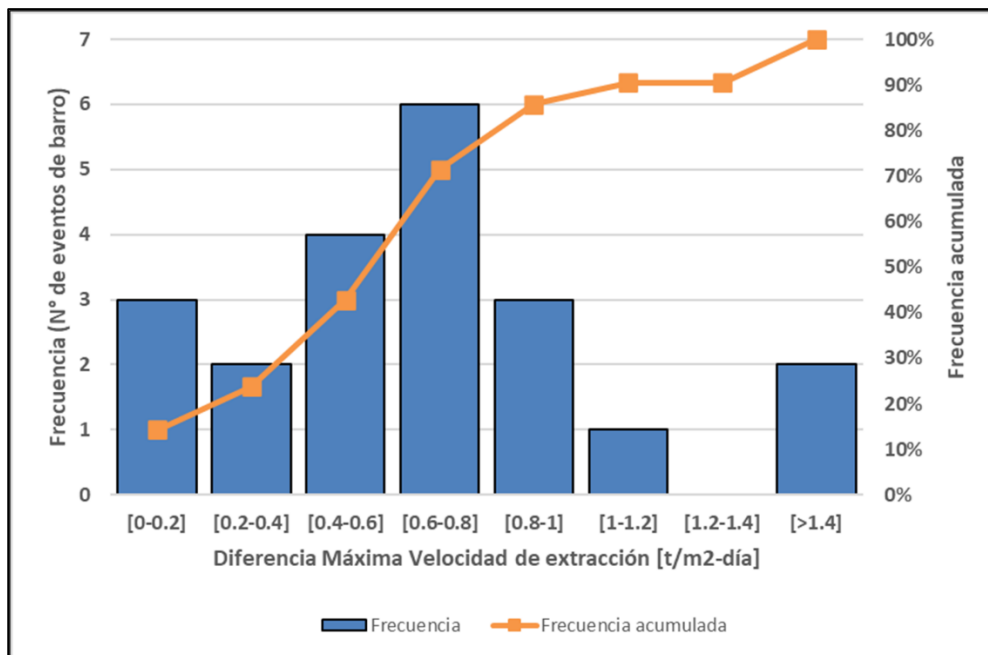
En el sector Esmeralda Bloque 1 & 2 se observa una situación similar, donde las frecuencias más altas de eventos se encuentran asociadas a velocidades de extracción bajas, tal como muestra la Figura 50.



**Figura 50: Distribución de velocidad de extracción para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Dado lo anterior, se propone un nuevo enfoque para evaluar la correlación entre los eventos de agua barro y las velocidades de extracción. Este nuevo enfoque consiste en calcular la máxima diferencia promedio de velocidad de extracción entre el PE y su vecindad.

Para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 51 muestra la distribución de la diferencia máxima promedio de velocidad de extracción de los últimos 30 días para los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura se infiere que el 57% de los eventos de agua barro ocurre con una diferencia máxima de velocidad de extracción entre el PE y sus vecinos por sobre los 0.6 ton/m<sup>2</sup>-día, lo que representa un comportamiento diferente al análisis mostrado anteriormente.



**Figura 51: Distribución de velocidad de extracción para eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

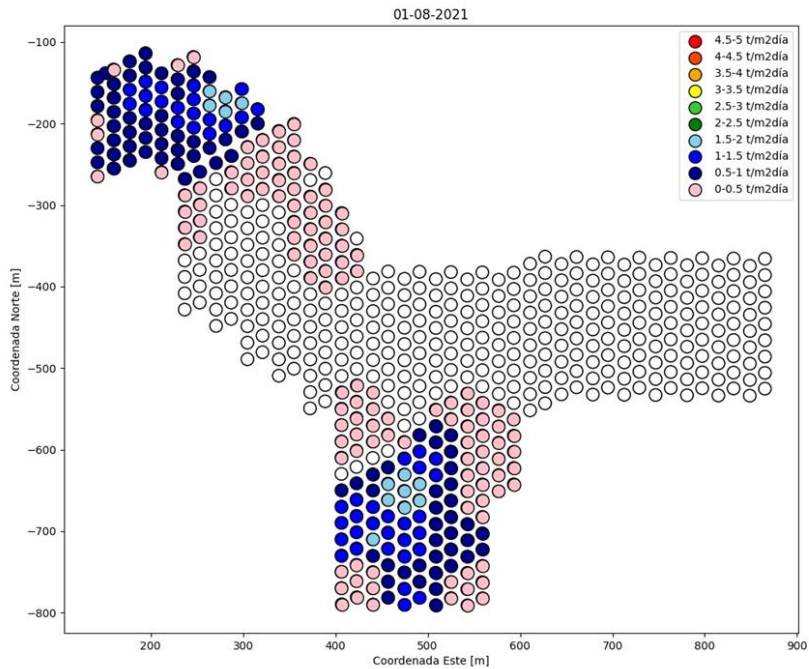
La Tabla 20 proporciona las estadísticas básicas de la máxima diferencia de velocidad de extracción entre el PE y sus vecinos para los eventos de agua barro registrados. Durante la incidencia de estos eventos, se destaca que la diferencia máxima promedio de velocidad alcanza los 0.66 t/m<sup>2</sup>-día  $\pm$  0.43 t/m<sup>2</sup>-día. Para realizar análisis sobre los puntos de extracción (PE) sin eventos de agua barro, se emplean las métricas en los periodos cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen.

**Tabla 20: Resumen con estadísticas básicas de diferencia de velocidad de extracción en Diablo Regimiento**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	0.66 t/m <sup>2</sup> - día	0.38 t/m <sup>2</sup> - día
Desviación estándar	0.43 t/m <sup>2</sup> - día	0.43 t/m <sup>2</sup> - día
Máximo	1.87 t/m <sup>2</sup> - día	3.13 t/m <sup>2</sup> - día
Mínimo	0.13 t/m <sup>2</sup> - día	0.06 t/m <sup>2</sup> - día

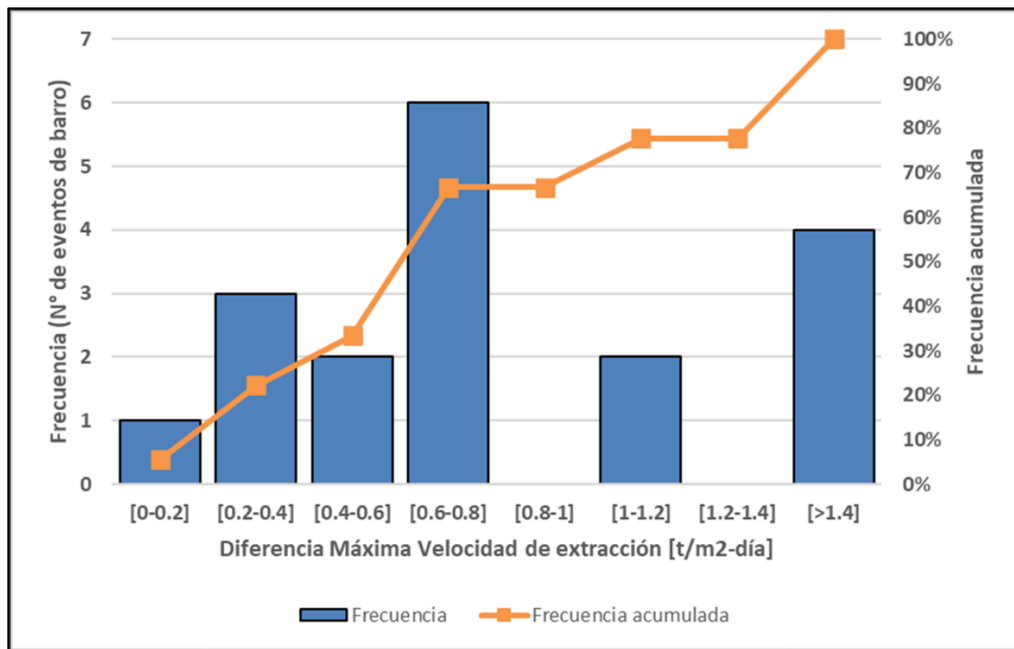
En la Figura 52 se muestra una vista en planta de la diferencia máxima promedio de velocidad de extracción de los últimos 30 días a escala de PE del sector Diablo Regimiento a Agosto del 2021.





**Figura 52: Diferencia Máxima Promedio Velocidad de Extracción a 30 días sector Diablo Regimiento**

Para el sector de Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 53 exhibe la distribución de la diferencia máxima promedio de velocidad de extracción de los últimos 15 días en los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura se infiere que el 67% de estos eventos se manifiesta con una diferencia máxima de velocidad de extracción de 15 días superior a los 0.6 t/m<sup>2</sup>-día.



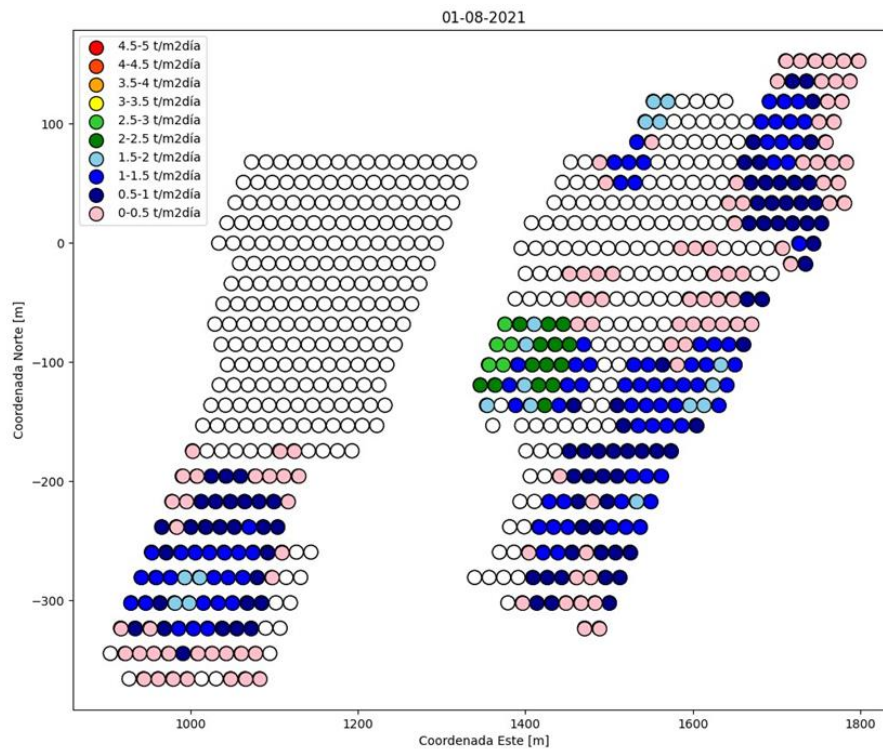
**Figura 53: Distribución de velocidad de extracción de 15 días para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 21 revela que durante la ocurrencia de eventos de agua barro, la diferencia máxima de velocidad de extracción presenta un valor promedio de  $0.89 \text{ t/m}^2\text{-día} \pm 0.69 \text{ t/m}^2\text{-día}$ . Para realizar análisis sobre los puntos de extracción (PE) sin eventos de agua barro, se emplean las métricas en los periodos cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen

**Tabla 21: Resumen con estadísticas básicas de velocidad de extracción de 15 días en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	0.89 t/m <sup>2</sup> día	1.04 t/m <sup>2</sup> día
Desviación estándar	0.69 t/m <sup>2</sup> día	0.72 t/m <sup>2</sup> día
Máximo	2.57 t/m <sup>2</sup> día	4.6 t/m <sup>2</sup> día
Mínimo	0.15 t/m <sup>2</sup> día	0.11 t/m <sup>2</sup> día

En la Figura 54 se muestra una vista en planta de la diferencia máxima promedio de velocidad de extracción de los últimos 15 días a escala de PE del sector de Esmeralda Bloque 1 & 2 a Agosto del 2021.



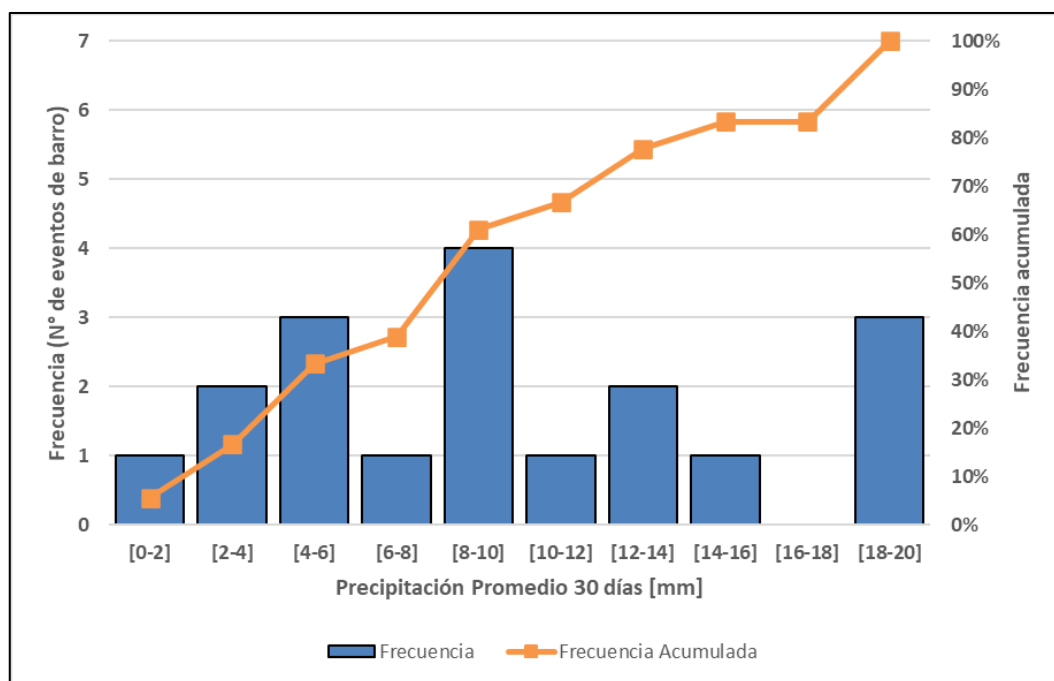
**Figura 54: Diferencia Máxima Promedio Velocidad de Extracción a 15 días Esmeralda Bloque 1 & 2**

### 3.3.8 Precipitación

Como se ha destacado en los capítulos previos, el componente esencial para la formación del barro es el agua. En este contexto, se procede a analizar la información de precipitación recopilada por División El Teniente. Esta información se obtuvo de diversas fuentes, incluyendo la Estación Sewell de los sitios MeteoChile y MeteoData, la Estación La Junta de MeteoData, y la Estación Cachapoal del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Los datos proporcionados abarcan las precipitaciones diarias y acumuladas por mes, expresadas en milímetros.

Posteriormente, se realizó un análisis temporal mediante la construcción de varias ventanas temporales para la variable de precipitación, abarcando diferentes enfoques como precipitación acumulada, precipitación promedio y precipitación máxima. Estas ventanas comprenden períodos diarios, de 15 días, 30 días, 45 días, 60 días, 90 días, semestrales y anuales.

En el caso del sector de Diablo Regimiento, la Figura 55 muestra la distribución de la precipitación promedio de 30 días para los eventos de agua barro registrados. A partir de la figura se infiere que el 51% de los eventos de barro ocurre con una precipitación promedio de 30 días por sobre los 8 mm.



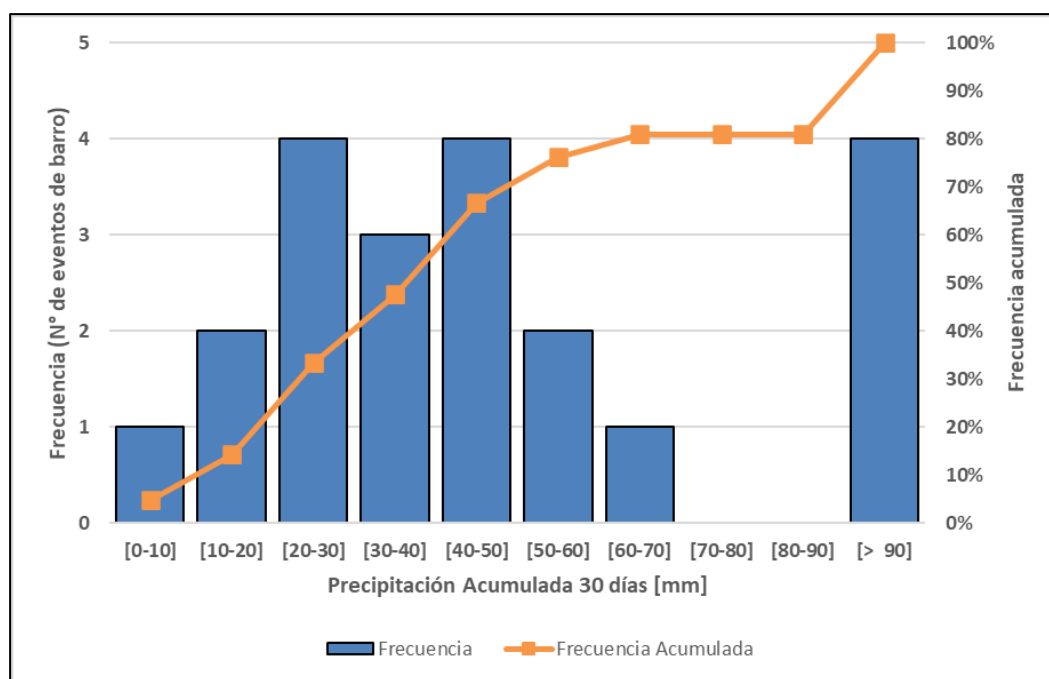
**Figura 55: Distribución de Precipitación promedio de 30 días para eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

La Tabla 22 muestra que, al momento de ocurrir los eventos de barro, la media para la precipitación promedio de los últimos 30 días era de  $11.27 \text{ mm} \pm 6.3 \text{ mm}$ .

**Tabla 22: Resumen con estadísticas básicas de precipitación promedio de 30 días en Diablo Regimiento**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	11.27 mm	5.12 mm
Desviación estándar	6.30 mm	6.39 mm
Máximo	20.27 mm	60.41 mm
Mínimo	1.9 mm	0 mm

Para el sector Esmeralda Bloque 1 y 2, La Figura 56 muestra la distribución de la precipitación acumulada durante 30 días para los eventos de agua barro documentados. Se destaca que el 28% de estos eventos de agua barro se manifiestan cuando la precipitación acumulada en 30 días supera los 45 mm.



**Figura 56: Distribución de precipitación acumulada de 30 días para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 23 destaca que, durante la ocurrencia de eventos de agua barro, se observó un valor promedio de 41.7 mm  $\pm$  30.7 mm para la precipitación acumulada en un periodo de 30 días. Este dato sugiere que la actividad de extracción durante épocas lluviosas podría incrementar el riesgo de eventos de agua barro.

**Tabla 23: Resumen con estadísticas básicas de precipitación acumulada de 30 días en Esmeralda Bloque 1 & 2**

<b>Estadísticas Básicas</b>	<b>PE con eventos de agua barro</b>	<b>PE sin eventos de agua barro</b>
Promedio	41.7 mm	29.6 mm
Desviación estándar	30.7 mm	55 mm
Máximo	147 mm	465 mm
Mínimo	9.2 mm	0 mm

## Capítulo 4

### **4 Construcción de modelos probabilísticos de eventos de agua barro en Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2**

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos de agua barro en los puntos de extracción en estado operativo, se ha desarrollado un modelo probabilístico que considera un modelo de regresión logística con un modelo de clasificación del nivel de riesgo.

En este capítulo, se expone la metodología y los resultados correspondientes a la construcción de los modelos probabilísticos de regresión logística en los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.

#### **4.1 Construcción de la base de datos de eventos de agua barro para regresión logística**

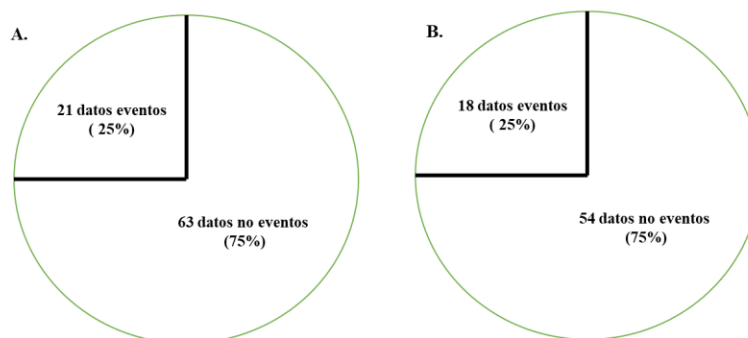
Dada la naturaleza de los datos, existe un desequilibrio entre las fechas con ocurrencia de eventos de agua barro y aquellas sin eventos. Por ejemplo, en el sector de Diablo Regimiento, solo hay 21 días con eventos de agua barro de un total de 6,086 días, lo que representa el 0.35% del total. Por lo tanto, el primer paso fue construir una base de datos equilibrada y representativa para los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.

Los modelos de regresión logística requieren dos conjuntos de datos: **eventos y no eventos**. Para evitar la subestimación debido a la predominancia del conjunto de no eventos, se implementó la estrategia de regresión logística basada en casos raros (King & Zeng, 2001).

Para el conjunto de eventos se consideraron todos los eventos de agua barro, mientras que los datos sin ocurrencia de eventos de agua barro, se consideraron como el conjunto de no eventos. En términos generales, la estrategia de casos raros implica una proporción de 1:3 en los datos, donde el 25% corresponde al conjunto de eventos y el 75% restante corresponde al conjunto de no eventos.

Para seleccionar el conjunto de no eventos se empleó la técnica de estratificación. Esta metodología consiste en dividir la población total, es decir, el conjunto completo de datos sin eventos de agua barro, en grupos homogéneos llamados estratos. Luego, se seleccionan muestras de cada uno de estos estratos.

Para este caso específico, la estratificación se realizó considerando la distribución de la altura de la columna extraída en los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2. Esto asegura que todas las fases operacionales de estos sectores, como el ramp-up (inicio de la extracción), el régimen (operación regular) y el ramp-down (finalización de la extracción), estén representadas en la muestra. A continuación, en la Figura 57 se muestra el porcentaje de registros de eventos de agua barro y de no eventos para la construcción de un modelo de regresión logística.



**Figura 57: Registro de eventos y no eventos para la construcción de un modelo de regresión logística**  
**A. Sector Diablo Regimiento      B. Sector Esmeralda Bloque 1 & 2**

## 4.2 Análisis univariable Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2

Para realizar un análisis univariable independiente y evaluar el riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro, se utilizó la Prueba de Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) y la Razón de Probabilidades (Odds Ratio, OR) para examinar la relación entre diversos factores de riesgo y la incidencia de eventos de agua barro.

La Odds Ratio tiene la capacidad de estimar la probabilidad de un evento de agua barro con  $x=1$  (ocurrencia) en comparación con puntos de extracción con ausencia de eventos donde  $x=0$  (Hosmer et al. 2013). Por ejemplo, si un punto de extracción informa la presencia de agua barro y se encuentra en una zona de alto riesgo con antecedentes de eventos de agua barro, un Odds Ratio de  $OR=3$  sugiere que la probabilidad de un evento de agua barro en la zona de riesgo es tres veces mayor que en áreas sin historial de incidentes de agua barro (para más detalles ver anexo B).

Para identificar las variables que afectan significativamente en la ocurrencia de eventos de agua barro, se estableció un valor crítico de 0.1 para el p-value en el análisis univariable. A partir de lo anterior, para el sector de Diablo Regimiento se llevó a cabo un análisis para 31 variables críticas, de las cuales solo 17 resultaron ser estadísticamente significativas (valor de  $p \leq 0.1$ ). La Tabla 24 presenta un resumen relacionado con las métricas obtenidas en este análisis.

En particular, las variables de humedad de laboratorio, evento previo y altura de columna de extracción destacan con los valores más altos en la prueba chi-cuadrado. Según el Odds Ratio, si la humedad de laboratorio aumenta en un 2%, la probabilidad de un evento de agua barro se incrementaría en un 55%. En segundo lugar, si la variable de evento previo es igual a 1, es decir, si el PE registró un evento anterior, la probabilidad de que ocurra un evento de agua barro aumenta en un 142%. Finalmente, si la altura de columna extraída aumenta en 50 m, la probabilidad de que ocurra un evento de agua barro se eleva un 88%. Las demás variables muestran un grado menor de asociación estadística con los eventos de agua barro, debido a los bajos valores de la prueba de chi-cuadrado.

**Tabla 24: Variables de riesgo y su correlación con la entrada de barro, ordenadas por la significancia estadística (valor p) para Diablo Regimiento.**

Variable	Coefficiente	Test chi-cuadrado ( $\chi^2$ )	Odds Ratio	Significancia estadística (p value)
Evento previo	5.263	<b>64.20</b>	<b>7.89</b>	<b>&lt;0.001</b>
Humedad de laboratorio [%]	0.388	<b>76.83</b>	<b>1.24</b>	<b>&lt;0.001</b>
Altura de columna extraída [m]	0.013	<b>48.68</b>	<b>1.01</b>	<b>&lt;0.001</b>
Humedad observada	0.807	27.83	5.07	<b>&lt;0.001</b>
Razón de extracción [%]	1.472	31.67	5.91	<b>&lt;0.001</b>
Vecino barro	2.395	27.11	12.39	<b>&lt;0.001</b>
Secundario extraído en el PE [%]	0.050	6.46	1.11	<b>&lt;0.001</b>
Zona de depresión 50 m	1.610	12.06	11.06	<b>&lt;0.001</b>
Primario extraído en el PE [%]	-0.018	12.56	0.97	<b>&lt;0.001</b>
Uniformidad [%]	1.797	9.22	0.99	<b>0.001</b>
Quebrado extraído en el PE [m]	0.017	10.27	1.02	<b>0.001</b>
Distancia a la superficie [m]	-0.013	10.35	0.97	<b>0.003</b>
Velocidad de extracción de 30 días [t/m <sup>2</sup> día]	1.152	6.75	0.99	<b>0.003</b>
Zona de depresión 100 m	1.810	12.16	1.00	<b>0.004</b>
Zona de depresión 80 m	1.336	9.01	1.00	<b>0.004</b>
Velocidad de extracción de 15 días [t/m <sup>2</sup> día]	1.023	6.16	0.99	<b>0.004</b>
Precipitación promedio de 30 días [mm]	0.012	2.50	0.99	<b>0.08</b>
Precipitación promedio de 15 días [mm]	0.013	1.21	0.99	0.095
Caudal máximo [L/s]	0.001	0.62	1.00	0.393
Fragmentación Estimada d50 [m]	0.238	0.31	1.00	0.557
Precipitación acumulada de 30 días [mm]	-0.002	0.36	0.99	0.575
Precipitación acumulada de 45 días [mm]	-0.002	0.33	0.99	0.596
Delta de distancia a la superficie [m]	0.010	0.19	1.07	0.670
Zona de depresión 30 m	-0.431	0.20	1.00	0.674
Precipitación máxima promedio de 60 días [mm]	-0.003	0.14	0.99	0.721
Sector de barros históricos	0.112	0.06	1.00	0.799
Precipitación máxima promedio de 15 días [mm]	0.003	0.06	1.00	0.808
Precipitación acumulada de 15 días [mm]	-0.001	0.05	0.99	0.826
Precipitación máxima promedio de 30 días [mm]	-0.002	0.03	0.99	0.855
Precipitación acumulada de 60 días [mm]	0.001	0.03	1.00	0.856
Precipitación promedio de 60 días [mm]	0.004	0.01	1.00	0.919

El análisis anterior indica que los eventos de agua barro de Diablo Regimiento generalmente ocurre en condiciones de extracción excesiva (con alta altura de columna extraída), con un alto porcentaje de humedad determinado por pruebas de laboratorio, y en puntos de extracción con un evento previo. Por lo tanto, basado en el análisis univariable, durante el proceso de planificación



de corto plazo, se debe tener en cuenta el tonelaje diario extraído, considerando los puntos de extracción que muestran altas humedades en las pruebas de laboratorio, y teniendo en cuenta los puntos de extracción donde haya ocurrido un evento de agua barro.

En particular para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2 el análisis univariable fue llevado a cabo para 28 variables críticas, de las cuales solo 18 fueron estadísticamente significantes ( $p$  value  $\leq 0.1$ ). La Tabla 25, muestra un resumen asociado a las métricas obtenidas en este análisis.

Las variables de humedad de laboratorio, humedad observada y vecino barro destacan con los valores más altos en la prueba chi-cuadrado. Según el Odds Ratio, si la humedad de laboratorio aumenta en un 2%, la probabilidad de un evento de agua barro se incrementaría en un 58%. En segundo lugar, si la variable de humedad observada aumenta una categoría, es decir cambia su estado de seco a húmedo, la probabilidad de ocurrencia de evento de agua barro incrementa un 128%. Por último, si la variable vecino barro aumenta en 1 PE, es decir, se declara un PE vecino con evento de agua barro, la probabilidad de ocurrencia de eventos aumenta a 112%.

**Tabla 25: Variables de riesgo y su correlación con la entrada de barro, ordenadas por la significancia estadística (valor  $p$ ) para sector Esmeralda Bloque 1 & 2**

Variable	Coefficiente	Test chi-cuadrado ( $\chi^2$ )	Odds Ratio	Significancia estadística (p value)
Humedad de laboratorio [%]	0.544	<b>132.44</b>	<b>5.51</b>	<b>&lt;0.001</b>
Humedad observada	1.435	<b>76.35</b>	<b>5.07</b>	<b>&lt;0.001</b>
Evento previo	6.360	21.21	3.42	<b>&lt;0.001</b>
Velocidad de extracción de 15 días [t/m <sup>2</sup> día]	0.738	14.96	0.99	<b>&lt;0.001</b>
Velocidad de extracción de 30 días [t/m <sup>2</sup> día]	0.822	15.31	0.99	<b>&lt;0.001</b>
Uniformidad 30 días [%]	3.339	20.22	1.00	<b>&lt;0.001</b>
Delta de distancia a la superficie [m]	-0.113	20.63	0.91	<b>&lt;0.001</b>
Vecino barro	2.654	<b>28.16</b>	<b>10.58</b>	<b>&lt;0.001</b>
Zona de depresión 80 m	2.439	24.66	1.00	<b>&lt;0.001</b>
Quebrado extraído en el PE [%]	0.020	14.99	0.99	<b>&lt;0.001</b>
Zona de depresión 100 m	3.767	15.97	1.00	<b>&lt;0.001</b>
Distancia a la superficie [m]	-0.017	22.50	0.98	<b>&lt;0.001</b>
Zona de depresión 50 m	1.679	7.57	1.00	<b>0.001</b>
Altura de columna extraída [m]	0.003	5.16	1.00	<b>0.007</b>
Caudal máximo [L/s]	0.003	4.88	1.00	<b>0.008</b>
Precipitación máxima promedio de 60 días [mm]	0.044	3.37	1.00	<b>0.045</b>
Precipitación promedio de 60 días [mm]	0.057	3.14	0.99	<b>0.045</b>
Precipitación acumulada de 30 días [mm]	-0.007	3.03	1.00	<b>0.095</b>
Razón de extracción [%]	0.226	1.52	0.99	0.166
Fragmentación d <sub>50</sub> [m]	-0.535	1.01	0.92	0.346
Precipitación máxima promedio de 30 días [mm]	0.021	0.37	0.90	0.520
Precipitación promedio de 30 días [mm]	0.021	0.37	0.99	0.520
Precipitación máxima promedio de 15 días [mm]	0.009	0.17	0.98	0.669
Precipitación acumulada de 45 días [mm]	0.001	0.13	0.99	0.706
Primario extraído en el PE [%]	0.002	0.13	0.99	0.723
Precipitación acumulada de 15 días [mm]	-0.003	0.06	0.99	0.814
Precipitación acumulada de 60 días [mm]	-0.001	0.02	0.99	0.888
Precipitación promedio de 15 días [mm]	0.004	0.01	1.00	0.904

El análisis anterior indica que los eventos de barro de Esmeralda Bloque 1 & 2 generalmente ocurren en puntos de extracción que tienen puntos vecinos inactivos con barro y con una alta humedad medida en laboratorio y/o observada. Por lo tanto, basado en el análisis univariable, durante el proceso de planificación de corto plazo se debe tener en cuenta la humedad (de laboratorio y observada) considerando las zonas en donde existen puntos inactivos con barro.

Este análisis permitió identificar las principales variables relacionadas con los eventos de agua barro en los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2. Sin embargo, no considera la correlación entre las variables, la cual se evalúa en el análisis multivariable.

#### **4.3 Construcción modelo multivariable de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2**

En términos generales, la regresión logística se basa en el cálculo de probabilidades, estimando estas probabilidades a partir de información estadística (para más detalles, consulte el Anexo C). Este método se utiliza para desarrollar un modelo predictivo de eventos de agua barro. En este contexto, la variable dependiente dicotómica en la regresión logística es la ocurrencia del evento de agua barro.

Para construir y evaluar el modelo de regresión logística, se empleó la metodología de entrenamiento y validación del conjunto de datos. El conjunto de datos completo, que incluye tanto eventos de agua barro como no eventos, se dividió en dos partes: el conjunto de entrenamiento, que comprende el 80% de los datos, y el conjunto de validación, que representa el 20% restante.

El conjunto de entrenamiento se utilizó para ajustar el modelo, permitiendo que este aprenda y capte las relaciones entre las variables predictoras y la ocurrencia de eventos de agua barro. Este proceso de ajuste es esencial para que el modelo pueda identificar patrones y tendencias relevantes en los datos de entrenamiento. Mientras el conjunto de validación, por su parte, se utilizó para evaluar el rendimiento del modelo. Este paso es crucial para garantizar que las predicciones del modelo no solo se ajusten adecuadamente a los datos con los que fue entrenado, sino que también sean precisas y generalizables cuando se enfrentan a nuevos datos no vistos.

En la etapa de entrenamiento, se realizó la calibración de los modelos construidos llevando a cabo una comparación de los datos reales de eventos de agua barro con las predicciones generadas por el modelo mediante el uso de un valor de probabilidad de corte (CP). Este valor de probabilidad de corte permitió clasificar los puntos de extracción en una de las dos categorías de respuesta, es decir, 1 o 0, utilizando diversos niveles de probabilidad. La probabilidad de corte se define como el valor mínimo de probabilidad para el cual un punto de extracción se clasifica con riesgo de ocurrencia de evento de agua barro.

Durante la etapa de calibración, se realizaron pruebas con diferentes probabilidades de corte para construir tablas de contingencia (para más detalle ver Anexo D), con el objetivo de encontrar un modelo predictivo multivariable que maximice los indicadores clave de rendimiento (KPIs) del modelo.

Específicamente, en el análisis de eventos de agua barro para el sector de Diablo Regimiento, se evaluaron múltiples modelos en función de su rendimiento utilizando el conjunto de entrenamiento. Los modelos se compararon según métricas clave como precisión, sensibilidad y exactitud. En la Tabla 26 se presentan un total de 15 modelos evaluados. De estos, el modelo número 15 se destacó por proporcionar los mejores resultados en todas las métricas: precisión, sensibilidad y exactitud con una probabilidad de corte de 0.2962.

**Tabla 26: Resumen de modelos de regresión logística realizados para Diablo Regimiento.**

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Altura de columna extraída [m]					X	X	X						X		
Razón de extracción [%]				X				X						X	
Uniformidad [%]	X	X	X			X				X	X	X			X
Velocidad de extracción de 15 días[t/m <sup>2</sup> día]							X		X			X			
Velocidad de extracción de 30 días [t/m <sup>2</sup> día]		X			X					X			X		X
Vecino barro						X								X	
Distancia a la superficie [m]			X								X	X			X
Delta de distancia a la superficie [m]								X	X	X			X		
Zonas de depresión (30 m-50 m-80 m-100 m)	X			X	X	X	X			X				X	
Caudal máximo [L/s]					X			X							
Humedad observada						X					X	X		X	
Humedad de laboratorio [%]									X				X		X
Precipitación promedio de 30 días [mm]										X				X	X
Precipitación máxima promedio de 60 días [mm]		X	X	X		X	X								
Precipitación acumulada de 30 días [mm]									X		X	X			
Primario extraído en el PE [%]							X	X	X				X	X	
Secundario extraído en el PE [%]	X		X			X				X			X		
Quebrado extraído en el PE [%]					X							X			X
Fragmentación d50 [m]			X								X	X			
Zona de barros históricos	X			X							X				

A continuación, en la Tabla 27 se muestran los resultados del mejor modelo logístico de eventos de agua barro para Diablo Regimiento, el cual está representado por la siguiente ecuación. Además, se presentan las variables utilizadas y sus coeficientes, junto con una descripción de cómo cada una de estas variables afectaría la probabilidad de que ocurra un evento de agua barro.

$$\text{Diablo Regimiento: } P_{Eb} = \frac{e^{-0.08-0.588\text{UNIF}+0.849\text{DIF\_VEL30}-0.009\text{DPTOPO}+0.007\text{QUE}+0.571\text{HLAB}+0.049\text{PP30}}}{1+e^{-0.08-0.588\text{UNIF}+0.849\text{DIF\_VEL30}-0.009\text{DPTOPO}+0.007\text{QUE}+0.571\text{HLAB}+0.049\text{PP30}}}$$

Donde:

- $P_{Eb}$  indica la probabilidad de ocurrencia un evento de agua barro
- UNIF representa la uniformidad a 30 días [%]
- QUE es el material quebrado extraído en el PE [%]
- DIF\_VEL representa la diferencia máxima en la velocidad de extracción promedio [ $t/m^2$  –día]
- HLAB es la humedad de laboratorio [%]
- PP30 es la precipitación promedio a 30 días [mm]

**Tabla 27: Modelo logístico de eventos de agua barro para Diablo Regimiento**

Variable	Coficiente	Odds Ratio	Descripción
Uniformidad [%]	-0.588	0.555	Una disminución del 10% en la uniformidad aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 6%.
Velocidad de extracción de 30 días [ $t/m^2$ –día]	0.849	2.337	Un aumento en la diferencia máxima promedio de velocidad de extracción de 0.1 [ $t/m^2$ –día] aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 9%.
Distancia a la superficie [m]	-0.009	0.991	Una disminución en la distancia a la superficie de 10 [m] aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 9%.
Porcentaje de quebrado extraído en el PE [%]	0.007	1.007	Un aumento del 10% en el porcentaje de quebrado extraído en el PE aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 7%.
Humedad de Laboratorio [%]	0.571	1.770	Un aumento del 1% en la humedad de laboratorio aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 77%.
Precipitación Promedio 30 días [mm]	0.049	1.050	Un aumento de 5 [mm] en la precipitación promedio en los últimos 30 días aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 28%.

Para el sector Esmeralda Bloque 1 & 2 se evaluaron varios modelos en función de su rendimiento utilizando el conjunto de entrenamiento. Los modelos fueron comparados considerando métricas clave como precisión, sensibilidad y exactitud. En la Tabla 28 se presentan un total de 16 modelos. Entre ellos, el modelo número 16 destacó por ofrecer los mejores resultados en todas las métricas evaluadas: precisión, sensibilidad y exactitud con una probabilidad de corte 0.2534.

**Tabla 28: Resumen de modelos de regresión logística realizados para Esmeralda Bloque 1 & 2**

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Altura de columna extraída [m]	X					X	X	X								
Razón de extracción [%]					X				X	X						
Uniformidad [%]		X	X	X			X				X	X	X	X	X	X
Velocidad de extracción de 15 días [t/m <sup>2</sup> dia]								X							X	X
Velocidad de extracción de 30 días [t/m <sup>2</sup> dia]			X			X				X	X		X			
Vecino barro							X				X					
Distancia a la superficie [m]	X			X								X		X	X	X
Delta de distancia a la superficie [m]									X				X			
Zonas de riesgo (30 m-50 m-80 m-100 m)		X			X	X	X	X		X	X		X			
Caudal máximo [L/s]						X			X							
Humedad observada							X			X	X			X	X	
Humedad de laboratorio [%]																X
Precipitación promedio (15 – 30 -60 días) [mm]											X		X			
Precipitación máxima promedio (15- 30 – 60 días) [mm]	X		X	X	X		X	X		X		X				
Precipitación acumulada (15-30-45-60 días) [mm]														X	X	X
Primario extraído en el PE [%]								X	X							
Quebrado extraído en el PE [%]						X					X	X			X	X
Fragmentación d <sub>50</sub> [m]				X										X	X	
Zona de barro histórico		X			X					X				X		

A continuación, en la Tabla 29 se muestran los resultados del mejor modelo logístico de eventos de agua barro para Esmeralda Bloque 1 & 2, el cual está representado por la siguiente ecuación. Además, se presentan las variables utilizadas y sus coeficientes, junto con una descripción de cómo cada una de estas variables afectaría la probabilidad de que ocurra un evento de agua barro.

$$Esmeralda: P_{Em}(x) = \frac{e^{-0.03-0.019UNIF+0.131DIF\_VEL15-0.005DTOP0+0.012QUE+0.398HLAB+0.003P30}}{1+e^{-0.03-0.019UNIF+0.131DIF\_VEL15-0.005DTOP0+0.012QUE+0.398HLAB+0.003P30}}$$

Donde:

- P<sub>Eb</sub> indica la probabilidad de ocurrencia de un evento de agua barro
- UNIF representa la uniformidad a 30 días [%]
- QUE es el material quebrado extraído en el PE [%]
- DIF\_VEL representa la diferencia máxima en la velocidad de extracción promedio [t/m<sup>2</sup> – día]
- HLAB es la humedad de laboratorio [%]
- P30 es la precipitación acumulada a 30 días [mm]

**Tabla 29: Modelo logístico de eventos de agua barro para Esmeralda Bloque 1 & 2**

Variable	Coefficiente	Odds Ratio	Descripción
Uniformidad [%]	-0.019	0.981	Una disminución del 5% en la Uniformidad, aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 10%.
Velocidad de Extracción de 15 días [ $t/m^2$ -día]	0.131	1.140	Un aumento en la diferencia máxima promedio de velocidad de extracción de 0.5 [ $t/m^2$ -día], aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 7%.
Distancia a la superficie [m]	-0.005	0.995	Una disminución en la distancia a la superficie de 50 [m], aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 27%.
Porcentaje de quebrado extraído en el PE [%]	0.012	1.012	Un aumento en Porcentaje de quebrado extraído en el PE del 10%, aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 12%.
Humedad Laboratorio [%]	0.398	1.489	Un aumento en la Humedad de laboratorio de un 1%, aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 49%
Precipitación acumulada 30 días [mm]	0.003	1.003	Un aumento en la precipitación promedio en los últimos 30 días de 20 [mm], aumenta la probabilidad de riesgo de evento de agua barro en un 6%

#### 4.4 Validación de modelos logísticos de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2

La validación de los modelos construidos se llevó a cabo utilizando el 20% restante del conjunto de datos, que no fue empleado durante la etapa de entrenamiento. Esta etapa es fundamental para evaluar la capacidad del modelo de generalizar sus predicciones a nuevos datos, asegurando así su capacidad para predecir eventos de agua barro.

Durante la validación, el modelo ajustado con el conjunto de entrenamiento se aplica al conjunto de validación para estimar la ocurrencia de eventos de agua barro. Las predicciones del modelo se comparan con los resultados observados en el conjunto de validación, permitiendo una evaluación de su desempeño en términos de métricas clave. Los principales indicadores clave de rendimiento para los modelos de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2 se pueden observar en la Tabla 30.

**Tabla 30: Resultado de principales indicadores de modelos de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2**

Modelo	Tasa de verdaderos positivos	Tasa de verdaderos negativos	Exactitud
Diablo Regimiento	85%	81%	81%
Esmeralda (B1 & B2)	85%	85%	86%

Después de la etapa de validación de los modelos logísticos de eventos de agua barro, se realiza una segunda etapa. En esta etapa, se desarrolló un modelo condicional, que categoriza el nivel de riesgo en los puntos de extracción en función de variables como la humedad observada (HO), Fragmentación estimada de FlowSim BC v6.3 ( $d_{50}$ ), altura de columna extraída (COL) y Evento previo Bombeo (EPB).

El objetivo de categorizar el nivel de riesgo en los puntos de extracción es identificar zonas de alto y mediano riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro para apoyar a la planificación de corto plazo a implementar medidas de mitigación basadas en función de nivel de riesgo. La evaluación del modelo sigue la lógica para determinar si un punto está en alto riesgo es mostrada en la Figura 58. La condición de la altura de columna de extracción depende del sector en el que se evalúe el modelo condicional. En el sector de Esmeralda Bloque 1 & 2 debe ser mayor o igual a 150 m para considerarse como alto riesgo, mientras que, en Diablo Regimiento, de 165 m.

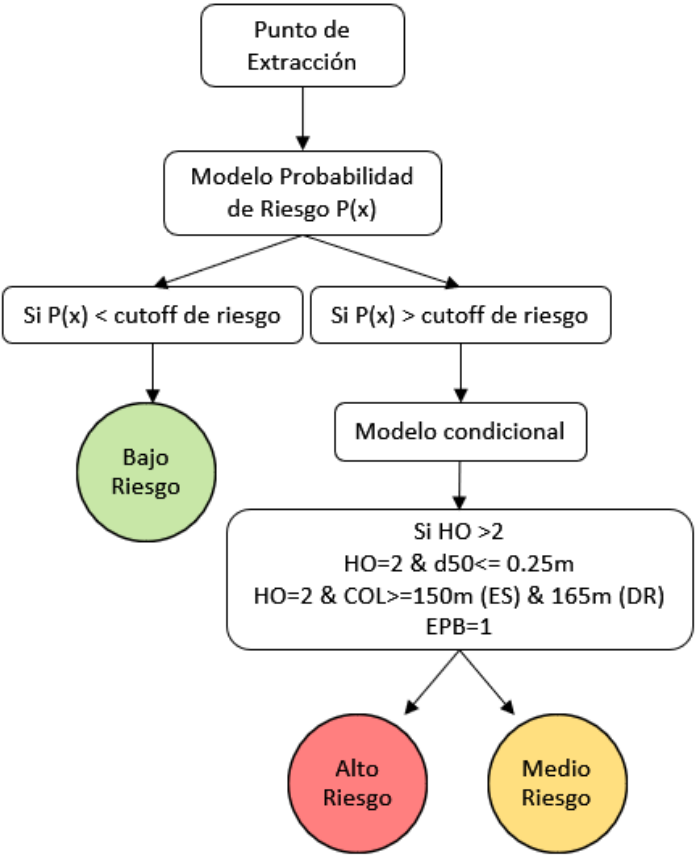


Figura 58: Diagrama esquemático del algoritmo de clasificación del nivel de riesgo

**4.5 Evaluación de resultados modelo probabilístico de eventos de agua barro**

**4.5.1 Diablo Regimiento**

Los resultados para el mejor modelo probabilístico del sector Diablo Regimiento se muestran en la Tabla 31. En particular para el 29 de agosto y 2 de septiembre del 2018, donde 10% del footprint operativo fue clasificado en alto riesgo. Además, de los 21 eventos de agua barro del sector Diablo Regimiento, el modelo predijo que 18 eventos estaban en riesgo alto, 1 en riesgo medio y 2 en riesgo bajo (Tabla 32), lo cual representa un 86% de precisión aproximadamente (considerando los 14 de 18 eventos en alto riesgo).

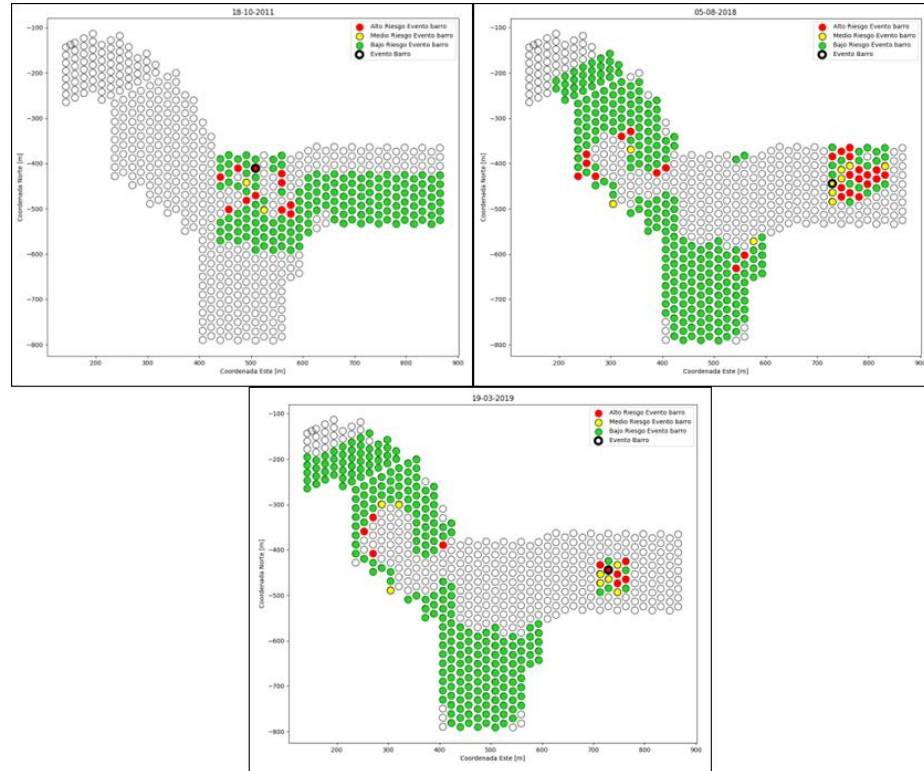
**Tabla 31: Evaluación de footprint operativo para el sector Diablo Regimiento.**

Evaluación del riesgo de eventos de agua barro	Diablo Regimiento					
	18-10-2011	21-08-2013	03-05-2018	29-08-2018	02-09-2018	10-08-2019
PE en operación	172	213	296	300	303	278
PE alto riesgo modelo logístico	13	9	34	40	40	20
PE en medio riesgo modelo probabilístico	2	2	9	9	9	10
PE alto riesgo modelo probabilístico	11	7	25	31	31	10
Footprint operativo en alto riesgo [%]	6%	3%	8%	10%	10%	4%

**Tabla 32: Clasificación de los eventos de agua barro en las categorías de riesgo.**

Estado del Punto de Extracción	Eventos de Agua Barro (21 en total)	Porcentaje
Alto Riesgo	18	86%
Medio Riesgo	1	5%
Bajo Riesgo	2	9%

En la Figura 59, se ven los resultados plasmados en el footprint, señalando el tipo de riesgo de cada punto e indicando el evento de barro asociado a su correspondiente fecha.



**Figura 59: Resultados del modelo probabilístico de corto plazo para sector Diablo Regimiento con fechas de 18 de noviembre del 2011, 5 de agosto de 2018 y 19 de marzo de 2019**



## 4.5.2 Esmeralda Bloque 1 & 2

En la Tabla 33 se muestran los resultados para el mejor modelo probabilístico del sector Esmeralda Bloque 1 & 2. En particular para el 28 de febrero del 2018, el 11% del footprint operativo del Bloque 1 fue clasificado en alto riesgo y solo 1 punto de extracción del Bloque 2 fue clasificado como riesgo medio. De los 18 eventos de barro del sector Esmeralda Bloque 1 & 2, el modelo predijo que 14 eventos estaban en riesgo alto, 2 en riesgo medio y 2 en riesgo bajo (Tabla 34), lo cual representa un 78% de precisión aproximadamente (considerando los 14 de 18 eventos en alto riesgo).

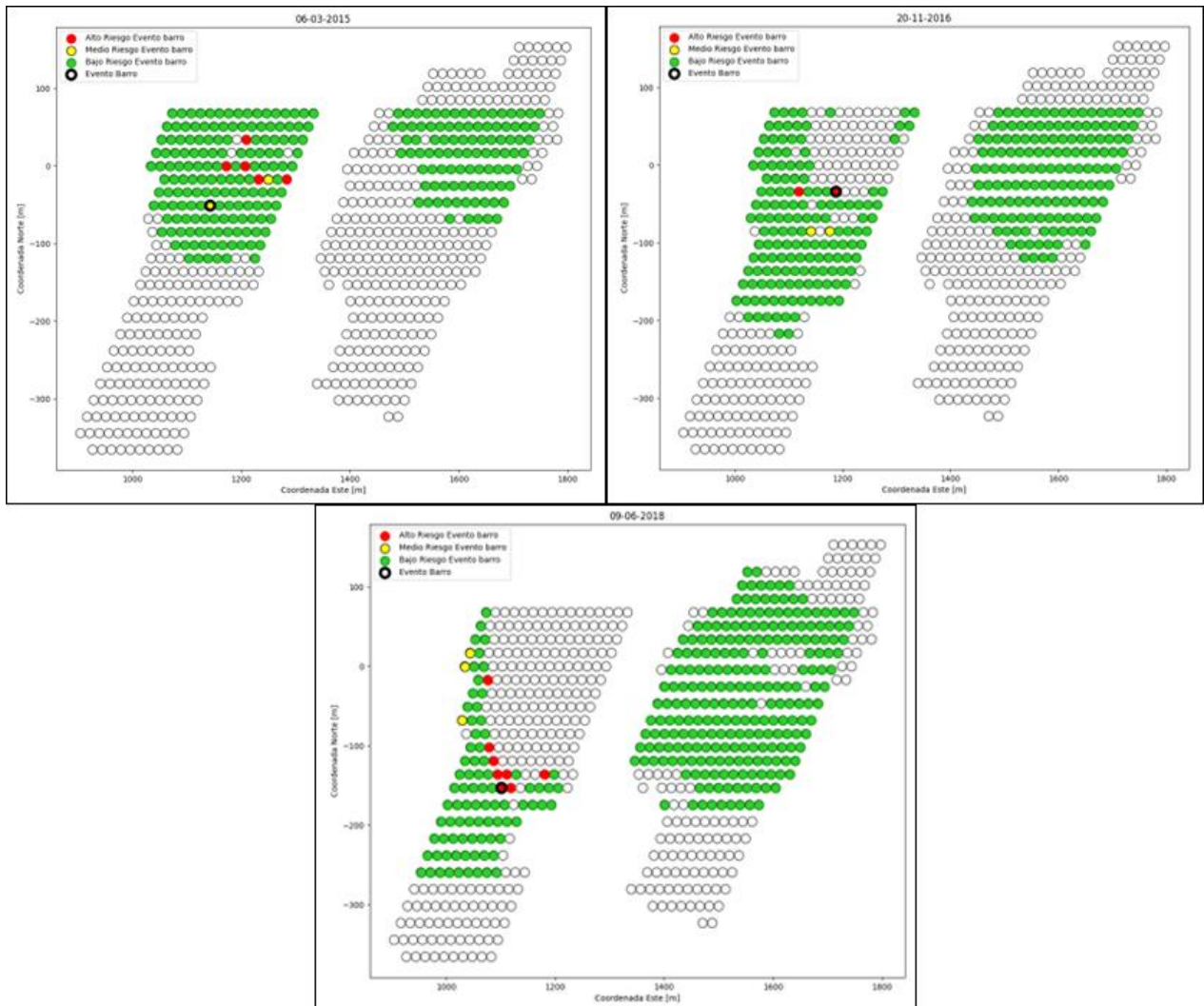
**Tabla 33: Evaluación de footprint operativo para el sector Esmeralda.**

Evaluación del riesgo de eventos de agua barro	Bloque 1 Esmeralda					
	02-10-2014	06-03-2015	07-03-2016	20-11-2016	08-11-2017	28-02-2018
PE en operación	144	159	169	151	107	94
PE alto riesgo modelo logístico	5	7	6	4	3	11
PE en medio riesgo modelo probabilístico	4	2	0	2	1	1
PE alto riesgo modelo probabilístico	1	5	6	2	2	10
Footprint operativo en alto riesgo [%]	1%	3%	4%	1%	2%	11%
Evaluación del riesgo de eventos de agua barro	Bloque 2 Esmeralda					
	02-10-2014	06-03-2015	07-03-2016	20-11-2016	08-11-2017	28-02-2018
PE en operación	82	95	142	146	196	203
PE alto riesgo modelo logístico	0	0	0	0	0	1
PE en medio riesgo modelo probabilístico	0	0	0	0	0	1
PE alto riesgo modelo probabilístico	0	0	0	0	0	0
Footprint operativo en alto riesgo [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%

**Tabla 34: Clasificación de los eventos de agua barro en las categorías de riesgo.**

Estado del Punto de Extracción	Eventos de Agua Barro (18 en total)	Porcentaje
Alto Riesgo	14	78%
Medio Riesgo	2	11%
Bajo Riesgo	2	11%

En la Figura 60, se ven los resultados plasmados en el footprint, señalando el tipo de riesgo de cada punto e indicando el evento de barro asociado a su correspondiente fecha.



**Figura 60: Resultados del modelo de corto plazo para el sector Esmeralda con fechas de 6 de marzo del 2015, 20 de noviembre de 2016 y 9 de junio del 2018**

### 4.5.3 Comparativa de modelos probabilísticos con Matriz de Criticidad DET

En base al riesgo de eventos de agua barro en El Teniente se ha determinado que es necesario un monitoreo constante, una extracción controlada y un diseño minero favorable. Se han tomado medidas preventivas para la ocurrencia de eventos de agua barro, como el monitoreo de la columna de extracción, de la fragmentación y de la humedad. División El Teniente implementó una Matriz de Criticidad (Salazar et al. 2016) para evaluar la condición en que se encuentran los PE y si existe riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro. En la Figura 61, se presenta dicha matriz, la cual considera los factores mencionados anteriormente, como la humedad cualitativa junto con el porcentaje de granulometría fina presente ( $< 25 \text{ cm}$ ). Con esto se definen 3 condiciones para los PE: normal, en observación o en estado de alerta.

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cms)			
		G (x) <25%	25% ≤ G(x) <50%	50% ≤ G(x) <75%	G(x) ≥ 75%
HUMEDAD CUALITATIVA	H0: Seco	Green	Green	Green	Green
	H1: Levemente húmedo	Green	Green	Yellow	Yellow
	H2: Húmedo	Green	Green	Yellow	Yellow
	H3: Barro incipiente	Green	Yellow	Red	Red
	H4: Barro	Yellow	Red	Red	Red
	A: Agua	Green	Green	Yellow	Red

LEYENDA		COMENTARIO
Green	Normal	Humedad y granulometría favorable para la continuidad operacional.
Yellow	Observación	Observación de la evolución de humedad y granulometría.
Red	Alerta	Alerta por la condición de humedad y granulometría.

Figura 61: Matriz de Criticidad DET (Salazar et al., 2016)

Al momento de realizar la evaluación de los modelos probabilísticos obtenidos, se pudo comprobar que la Matriz de Criticidad no era capaz de predecir de buena forma los eventos de agua barro. Esto quiere decir que en la fecha en que ocurrieron los eventos, en muy pocas ocasiones, la matriz indicaba un estado de alerta, a diferencia de los modelos probabilísticos que en la mayoría de las ocasiones se categorizaban como alto riesgo. Esto queda demostrado en la Tabla 35.

Tabla 35: Comparación entre modelos probabilísticos de corto plazo y matriz de criticidad

Estado del punto de extracción	Diablo Regimiento		Esmeralda	
	Modelo Probabilístico	Matriz de criticidad	Modelo Probabilístico	Matriz de criticidad
Alto riesgo – alerta	18	0	14	5
Medio riesgo –observación	1	12	2	9
Bajo riesgo – normal	2	9	2	4

Finalmente, con los resultados obtenidos se establece que:

- El modelo probabilístico de corto plazo para Diablo Regimiento predice el 86% de los eventos de agua barro en alto riesgo, mientras que la matriz de criticidad no tiene la capacidad de predecir los eventos de agua barro en estado de alerta.
- El modelo probabilístico de corto plazo para Esmeralda predice el 78% de los eventos de agua barro en alto riesgo, mientras que la matriz de criticidad solo predice el 28% en estado de alerta.
- La matriz de criticidad presenta una capacidad de predicción limitada debido a su alta dependencia del monitoreo en terreno con mediciones de humedades cualitativas y fragmentación en el punto de extracción. Por ende, una frecuencia de monitoreo discontinua afecta su efectividad para anticipar eventos de agua barro.

#### 4.5.4 Evaluación del riesgo del modelo probabilístico por tipo de eventos

Basándonos en los resultados obtenidos anteriormente, es esencial realizar un análisis para cuantificar cómo se comporta el modelo probabilístico en relación con los distintos tipos de eventos de agua barro registrados en los sectores evaluados. La Tabla 36 muestra una evaluación del riesgo del modelo probabilístico por tipo de eventos en Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2.

**Tabla 36: Evaluación del riesgo del modelo probabilístico por tipo de eventos en Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2**

Tipo de evento	Diablo Regimiento		Esmeralda Bloque 1 & 2	
	Cantidad de eventos registrados	Eventos declarados en riesgo por Modelo Probabilístico	Cantidad de eventos registrados	Eventos declarados en riesgo por Modelo Probabilístico
Bombeo	6	6 (100%)	2	2 (100%)
Escurrimiento	7	6 (86%)	11	9 (82%)
Desplazamiento	8	7 (88%)	5	5 (100%)

El análisis de la Tabla 36 revela que el modelo probabilístico muestra un buen ajuste en la predicción de eventos de tipo bombeo, logrando identificar el 100% de estos eventos en ambos sectores analizados. Esta precisión es crucial, considerando la naturaleza y el impacto de los eventos de bombeo. Dichos eventos cubren una superficie significativa de las labores mineras, afectando áreas que superan los 20 metros lineales en gradientes. Esta extensa cobertura puede interrumpir significativamente las operaciones, representar riesgos de daños a la infraestructura y, potencialmente, poner en peligro la seguridad del personal.

El análisis de los eventos de escurrimientos muestra que el modelo probabilístico tiene un buen ajuste, identificando correctamente el 86% de estos eventos en el sector Diablo Regimiento y el 82% en Esmeralda Bloque 1 & 2. Sin embargo, es importante destacar que este ajuste es inferior al obtenido para los eventos de tipo bombeo. La principal razón por la que el modelo no estimó ciertos eventos de escurrimientos en riesgo se debe a la falta de medición de la humedad de laboratorio en los puntos de extracción antes de la ocurrencia de estos eventos. Por lo tanto, aunque los modelos probabilísticos desarrollados han demostrado una notable capacidad de predicción para los eventos de agua barro, su eficacia está significativamente limitada por la necesidad de medir con precisión la humedad de laboratorio en el punto de extracción. Actualmente, esta variable crucial no puede ser predicha ni modelada de manera confiable con las tecnologías disponibles, y la frecuencia con que se mide en el terreno es fundamental para mantener la precisión del modelo.

## Capítulo 5

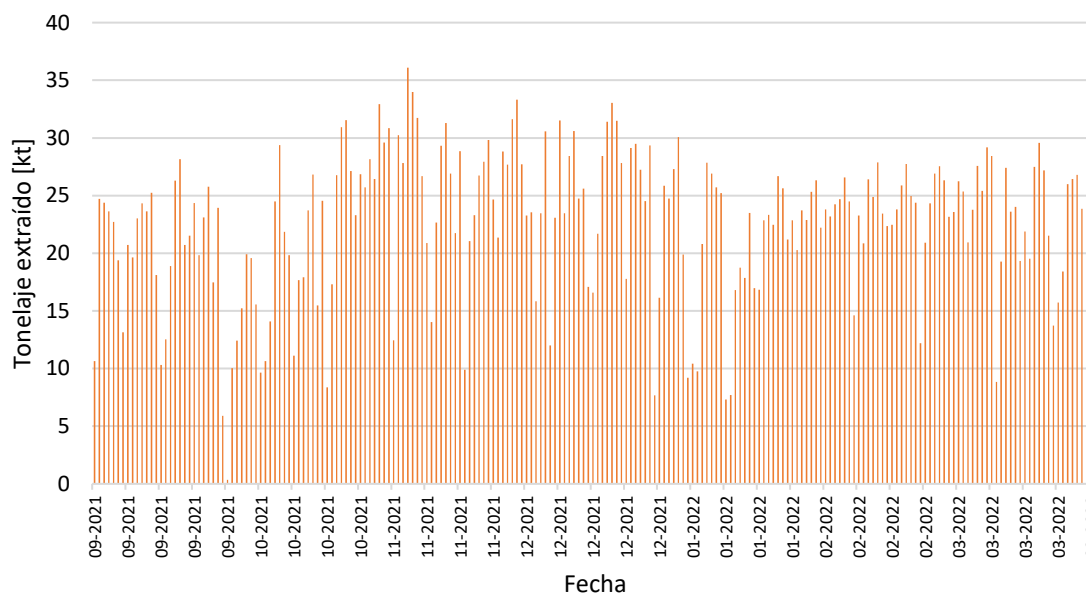
En este capítulo, se aplican y evalúan los modelos probabilísticos calibrados en los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2. Estos modelos se utilizan para analizar los planes de extracción desde septiembre de 2021 hasta marzo de 2022. El software FlowSim BC v6.3 se emplea para estimar el porcentaje de quebrado, mientras que otras variables se construyen a partir de la información proporcionada por la División El Teniente.

### 5.1 Aplicación de modelos probabilísticos

Una vez validado los modelos probabilísticos de los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2, se utilizaron para evaluar los planes de extracción de los sectores, este contempla una extracción desde septiembre 2021 hasta marzo de 2022, para estimar la variable de flujo porcentaje de quebrado, se utilizó el software FlowSim BC v6.3, las demás variables fueron construidas a partir de la información entregada por la División El Teniente.

#### 5.1.1 Aplicación en Diablo Regimiento

La extracción de Diablo Regimiento contempla un total de 4.8 Mt planificadas. A continuación, en la Figura 62 se ve un gráfico de barras en donde se presenta la extracción.

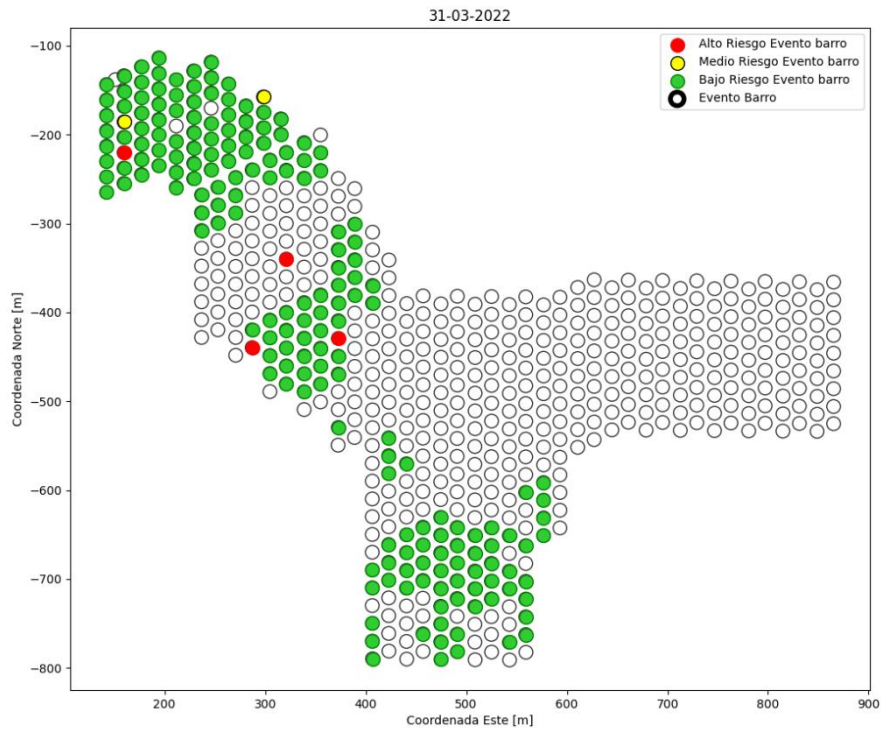


**Figura 62: Extracción para el sector Diablo Regimiento, desde septiembre 2021 hasta marzo 2022.**

A continuación, en la Tabla 37 y la Figura 63 se muestran los resultados obtenidos en Diablo Regimiento. En particular, el área declarada en riesgo de eventos de agua barro registró una disminución en las zonas de alto riesgo, pasando del 4% del footprint en riesgo el 31 de octubre de 2022 al 2% al finalizar el plan de extracción evaluado el 31 de marzo de 2022.

**Tabla 37: Evaluación de footprint operativo para el sector Diablo Regimiento.**

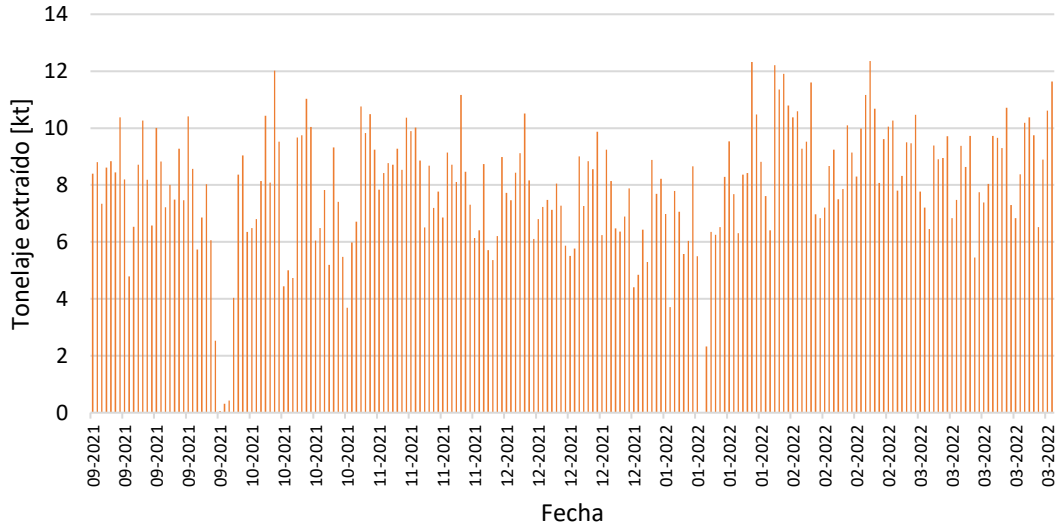
Evaluación del riesgo de eventos de agua barro	Diablo Regimiento			
	01-09-2021	31-10-2021	01-12-2021	31-03-2022
PE en operación	215	203	201	191
PE alto riesgo modelo logístico	12	20	18	6
PE en medio riesgo modelo probabilístico	6	12	14	2
PE alto riesgo modelo probabilístico	6	8	4	4
Footprint operativo en alto riesgo [%]	3%	4%	2%	2%



**Figura 63: Aplicación del modelo probabilístico del sector Diablo Regimiento con fecha de 31 de marzo 2022.**

### 5.1.2 Aplicación en Esmeralda Bloque 1

En el caso de Esmeralda, la extracción contempla un total de 1.7 Mt planificadas, el sector solo considera el Bloque 1, debido a que solo este continúa su extracción. A continuación, en la Figura 64 se ve un gráfico de barras en donde se presenta la extracción.



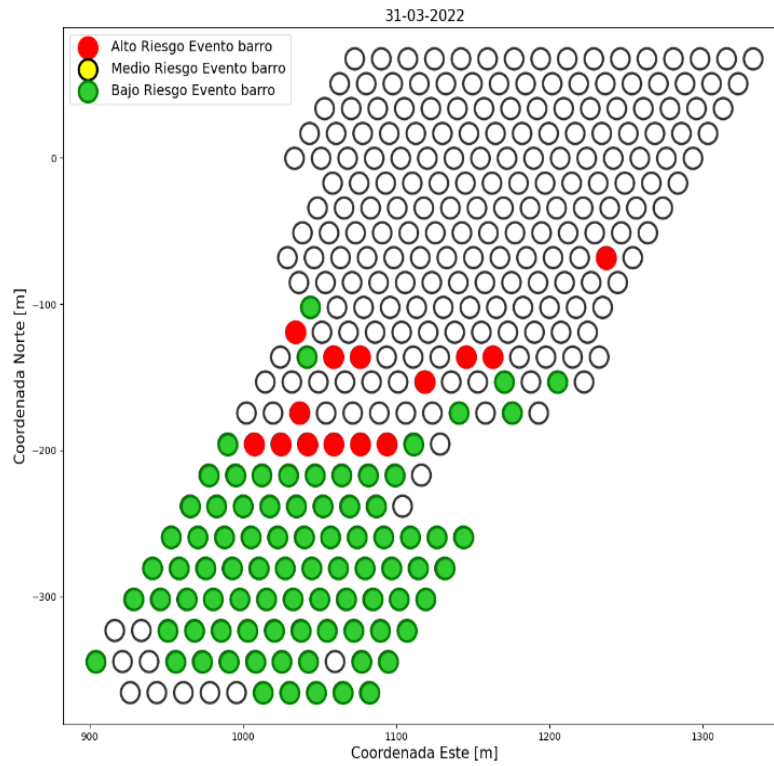
**Figura 64: Extracción para el sector Esmeralda, desde septiembre 2021 hasta marzo 2022.**

A continuación, en la Tabla 38 y la Figura 65 se muestran los resultados obtenidos en Esmeralda Bloque 1. En particular, el área declarada en riesgo de eventos de agua barro registró un aumento en zonas de alto riesgo, pasando del 6% del footprint en riesgo el 01 de septiembre de 2021 al 14% al finalizar el plan de extracción evaluado el 31 de marzo de 2022.

**Tabla 38: Evaluación de footprint operativo para el Esmeralda Bloque 1**

Evaluación del riesgo de eventos de agua barro	Bloque 1 Esmeralda			
	01-09-2021	31-10-2021	01-12-2021	31-03-2022
PE en operación	81	92	91	98
PE alto riesgo modelo logístico	5	10	9	14
PE en medio riesgo modelo probabilístico	0	1	2	0
PE alto riesgo modelo probabilístico	5	9	7	14
Footprint operativo en alto riesgo [%]	6%	10%	8%	14%





**Figura 65: Aplicación del modelo probabilístico en Esmeralda Bloque 1 con fecha de 31 de marzo 2022.**

## Capítulo 6

### 6.1 Conclusiones generales

En este estudio, se ha desarrollado un modelo probabilístico de eventos de agua barro en los sectores de Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 & 2 centrándose en la incorporación de variables operacionales de corto plazo. El principal objetivo fue determinar zonas de alto y medio riesgo con el propósito de definir estrategias de extracción que mitiguen los riesgos asociados con estos eventos.

Los modelos a corto plazo incorporaron variables operativas como uniformidad y velocidad de extracción, así como variables ambientales y topográficas, como la distancia desde el punto de extracción (PE) hasta la superficie, la humedad de laboratorio en el PE y la precipitación. Además, se incluyó una variable relacionada con la litología extraída, específicamente el porcentaje de material quebrado, obtenido del software de flujo por gravedad FlowSim BC v6.3 calibrado con datos de la mina.

Estos modelos a corto plazo han demostrado una precisión aceptable del 86% y 78% para los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda, respectivamente. En comparación, el modelo a corto plazo del sector Diablo Regimiento predice correctamente el 86% de los eventos de barro en alto riesgo, a diferencia de la matriz de criticidad, que no logra detectar ningún evento de agua barro de alto riesgo en estado de alerta. En el sector Esmeralda, el modelo predice el 78% de los eventos en alto riesgo, mientras que la matriz de criticidad solo alcanza a estimar el 28% de los eventos en estado de alerta.

Estos hallazgos resaltan la importancia de los modelos probabilísticos a corto plazo como herramientas esenciales para identificar zonas de alto riesgo de ocurrencia de eventos de agua barro. No obstante, es crucial reconocer una limitación significativa en la capacidad predictiva de estos modelos: la dependencia de la medición de la humedad en el punto de extracción. Esta variable no puede ser predicha ni modelada con precisión en el contexto actual, y la frecuencia con la que se puede medir en el terreno es un factor determinante para la eficacia del modelo. Sin la capacidad de monitorear los cambios en la humedad de manera oportuna, la habilidad de los modelos para prever eventos se ve considerablemente limitada.

En resumen, aunque los modelos desarrollados en este estudio han demostrado una precisión y capacidad de predicción notable, su eficacia está intrínsecamente ligada a la frecuencia y precisión de las mediciones de humedad en el punto de extracción. Para mejorar la utilidad predictiva de estos modelos, es esencial avanzar en técnicas de monitoreo de la humedad o desarrollar estrategias que puedan anticipar su variabilidad con mayor efectividad. A pesar de esta limitación, el enfoque presentado proporciona un marco valioso para evaluar planes a corto plazo en los sectores de la División El Teniente, apoyando significativamente la planificación y la toma de decisiones para mitigar los riesgos asociados con los eventos de agua barro. La robustez y la capacidad de predicción de estos modelos sugieren que la metodología podría aplicarse potencialmente a otros sectores que enfrenten desafíos similares con la ocurrencia de eventos de agua barro.

## 6.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Para mejorar la capacidad de identificar y gestionar los eventos de agua barro, es crucial centrarse en la evaluación de puntos de extracción que presenten ciertas características específicas. Estos incluyen la extracción no uniforme, la alta velocidad de extracción, la presencia de material quebrado, niveles elevados de humedad, poca distancia a la superficie y una alta precipitación acumulada. Estas variables han demostrado ser indicadores significativos de la probabilidad de ocurrencia de eventos de agua barro a corto plazo.

Además, se sugiere incorporar información adicional, como el caudal entrante a la cavidad de los sectores evaluados y/o el caudal estimado por punto de extracción, en los modelos probabilísticos. La inclusión de esta información podría enriquecer significativamente el modelo, proporcionando una comprensión más detallada de los factores que contribuyen a los eventos de agua barro.

Para asegurar la capacidad de predicción de los modelos desarrollados en este estudio, es fundamental actualizar continuamente la metodología con datos recientes. En particular, si se registran nuevos eventos de agua barro posterior al 31 de agosto de 2021, se recomienda revisar y recalibrar los modelos probabilísticos con estos nuevos datos. La actualización constante de los modelos asegurará que reflejen las condiciones actuales del terreno y mejoren su capacidad de predecir futuros eventos de agua barro.

Asimismo, se recomienda aplicar la metodología de modelamiento de regresión logística desarrollada en este estudio a otros sectores que puedan enfrentar desafíos similares asociados con la ocurrencia de eventos de agua barro. Este enfoque puede ser invaluable para la identificación temprana de zonas de riesgo y para la planificación de estrategias de mitigación.

Dado que el fenómeno de agua barro muestra características no lineales, se recomienda explorar y aplicar técnicas avanzadas de modelado, como las redes neuronales y otras herramientas matemáticas sofisticadas, a medida que se disponga de más datos sobre eventos de agua barro. Estas alternativas pueden ofrecer una representación más precisa de las complejidades en los datos, mejorando así la capacidad de predicción de los modelos.

Finalmente, dada la importancia crítica de la humedad de laboratorio como variable predictora y su actual limitación, es esencial investigar y desarrollar métodos avanzados para medir y anticipar la humedad en tiempo real. Tecnologías como sensores de humedad integrados y el uso de técnicas de modelado geofísico podrían ser exploradas para superar esta limitación. Mejorar la precisión y frecuencia de las mediciones de humedad permitiría potenciar significativamente la capacidad de predicción de los modelos desarrollados.

## **Bibliografía**

- Barber, J., Thomas, L., & Casten, T. (2000). *Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine. Proceedings of MassMin 2000*, G. Chitombo (ed) (pp. 289-294). Brisbane, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.
- Brannon, C., Casten, T., Hewitt, S., & Kumiawan, C. (2008). *Design and development update of the Grasberg block cave mine. Presented at the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining.*
- Brown. (2002). *Block Caving Geomechanics. Queensland: JKMRC.*
- Brown, E. T. (2003). *Block Caving Geomechanics. Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.*
- Butcher, R., Joughin, W., & Stacey, T. R. (2000). *Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines. SRK Consulting. South Africa: The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC)*
- Butcher, R., Stacey, T. R., & Joughin, W. (2005). *Mud rushes and methods of combating them. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 105, 817-824.*
- Castro, R., & Trueman, R. (2008). *An experimental review and simulations of gravity flow in coarse materials for block/panel caving. 6th International conference and exhibition on Mass Mining, 1043 - 1051.*
- Castro, R., Hekmat, M., Fuentes, M., Armijo, F., & Rodríguez, F. (2016). *FlowSim – A Versatile Flow Simulation Tool to Quantify Extraction and Design Alternatives for Block Caving. Proceedings of the Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining 2026, 645-652.*
- Castro, R., Arancibia, L., Guzman, D., & Henriquez, J. (2018). *Experiments and simulation of gravity flow in block caving through FlowSim. Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, 313- 322.*
- Castro, Raúl, Garcés, D., Brzovic, A., & Armijo, F. (2018). *Quantifying Wet Muck Entry Risk for Long-term Planning in Block Caving. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(9), 2965–2978. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1512-3>*
- Codelco ET, Mine, 2016a. *'El Teniente's production plan final report—PND 2016'. Mineral resources and development management. Internal report.*
- Cuello, D., & Whiteman, D. (2020). *The role of in-ground wireless geotechnical instrumentation in managing geohazards in Cave Mining. Proceedings of the 8th International Conference & Exhibition in Mass Mining (pp. 50-61). MassMin 2020, First Virtual Conference*
- Ferrada, M, 2011. *'Gravity Flow Under Moisture Conditions – Control and Management of Drawpoint Mudflow'. 35th APCOM Symposium Application of computer and operations research in the minerals industry, pp. 761-764.*

- Flores, G. (2019). *Major hazards associated with cave mining: are they manageable? (Figure 1)*, 31–46. [https://doi.org/10.36487/acg\\_rep/1905\\_0.3\\_flores-gonzalez](https://doi.org/10.36487/acg_rep/1905_0.3_flores-gonzalez)
- Fuentes, S. S., & Caceres, S. (2004). *Block/panel caving pressing final open pit limit*. *CIM Bulletin*, 97, 32–34.
- Garcés, D., Castro, R., Armijo, F., & Valencia, M. (2016). *Evaluación del riesgo de entrada temprana de barro para uso en minería de hundimiento durante el largo plazo Assessment of early mud entry risk for long term cave mining applications*. *UMining*, 439–451. Santiago.
- Gelcich, J. (2018). *Hydrogeological Modelling for Block Caving Mining Projects*. In Spanish. Santiago, University of Chile.
- GRMD-DET, 2019, "Análisis y metodologías para la planificación, control y extracción segura de reservas de mineral en zonas de ingreso de agua barro", Codelco, Santiago, Chile
- Ginting, A., & Pascoe, N. (2020). *Grasberg open pit to Grasberg block cave transition wet muck and mine design*. *Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining 2020*, 357-369.
- Hamrim, H. (2001). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. In *Underground Mining Methods and Applications*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Holder, A., Rogers, A. J., Bartlett, P. J., & Keytert, G. J. (2013). *Review of mud rush mitigation on kimberley's old scraper drift block caves*. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(7), 529–537.
- Hosmer, D, Lemeshow, S & Sturdivant, R, 2013. 'Applied logistic regression', vol 398. Wiley, New York.
- Hubert, G., Dirdjosuwondo, S., Plaisance, R., & Thomas, L. (2000). *Tele-Operation at Freeport to Reduce Wet Muck Hazards*. *Proceedings of MassMin 2000*, G. Chitombo (ed) (pp. 173-180). Brisbane, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.
- Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (2001). *Underground Mining Methods*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc
- Jakubec, J., Clayton, R., & Guest, A. R. (2016). *Mudrush risk evaluation*. *CIM Journal*, 7(1), 7–12. <https://doi.org/10.15834/cimj.2016.1>
- King, G & Zeng, L, 2001. 'Logistic Regression in Rare Events Data. *Political Analysis*'.
- Khodayari, Firouz, & Pourrahimian, Y. (2015). *Mathematical programming applications in block-caving scheduling: A review of models and algorithms*. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 6(3), 234–257. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2015.071174>

- Laubscher, D. (2000). *A practical manual on Block Caving*. Brisbane: Prepared for the International Caving Study, JKRMC and Itasca Consulting Group
- McCarthy, P. L., & Harvey, S. (1998). *Inrushes and Subsidence*. Underground Operators Conference. Townsville, Queensland.
- Navia, i, Castro, R, Valencia, M. (2014). *Statistical analyses of mud entry at Diablo Regimiento sector - El Teniente 's Mine*. *Caving*, 372–378. Santiago.
- Paetzold, H., Lourens, P., & Brazier, R. (2020). *Reopening and closure of a block cave*. *Proceedings of the 8th International Conference & Exhibition in Mass Mining* (pp. 103-114). *MassMin 2020, First Virtual Conference*.
- Pérez, A, 2021. 'Modelamiento del riesgo de ingreso de agua-barro en minas de Block Caving con aplicación en la planificación minera de largo plazo', s.l.: Tesis para optar al grado de Magister en Minería, Universidad de Chile.
- Salas, O., Castro, R., Viera, E., Basaure, K., Hidalgo, F., & Pereira, M. (2022). *Modelling of wet muck entry at El Teniente for long-term planning*. *Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, South Australia.
- Salazar, M., Mejias, O., Diez, E., & Urbina, S. (2016). *Update of Methodology for Qualitative Moisture Classification at Drawpoints and Update of Criticality Matrix for Better Decision Making*.
- Samosir, E., Basuni, J., Widijanto, E., & Syaifullah, T. (2008). *The Management of Wet Muck at PT Freeport Indonesia 's Deep Ore Zone Mine*. (June).
- SGC-GRL-DET, 2017, "Procedimiento General para el control del riesgo de Bombeo de agua-barro en la Mina", Codelco, Santiago, Chile.
- SGP-GRL-DET, 2010, "Definición de matriz de criticidad para el control del riesgo de Bombeo de agua-barro en la Mina", Codelco, Santiago, Chile.
- Susaeta, A. (2004). *Theory of gravity flow Part 1*. Santiago: MassMin.
- Varian, J., Mc Dougall, S., Ghadirianniari, S., Llewelyn, K., Campbell, R., Eberhardt, E & Moss, A. (2022). *Development of a wet mcuk spill susceptibility tool for short-term prediction through a logistic regression approach*. *Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, South Australia.
- Widijanto, E, Sunyoto, W, Wilson, A, Yudanto, W & Soebari, L, 2012. 'Lessons learned in wet muck management in Ertsberg East Skarn System of PT Freeport Indonesia'. In: *Massmin 2012: Proceedings of the sixth international conference & exhibition on mass mining*, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Ontario, Canada.
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2017). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann.

## Anexos

### Anexo A

A continuación, se encuentra el análisis exploratorio para las variables que no fueron incluidas en los modelos probabilísticos de eventos de agua barro:

#### Análisis de razón de extracción

Medido como la razón entre el tonelaje acumulado del punto al término de un periodo de evaluación y el tonelaje de su columna in-situ, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$RE [\%] = 100 \cdot \frac{\text{Tonelaje acumulado}_i(\text{ton})}{\text{Tonelaje de la columna insitu}_i(\text{ton})} \quad (i = 1, \dots, n)$$

Para Diablo Regimiento, la Figura 66 muestra la distribución de la razón de extracción para los eventos de agua barro registrados. Se observa que el 62% de los eventos ocurren con una razón de extracción mayor a 100%, es decir, cuando ya se ha extraído la totalidad de su altura de columna in-situ.

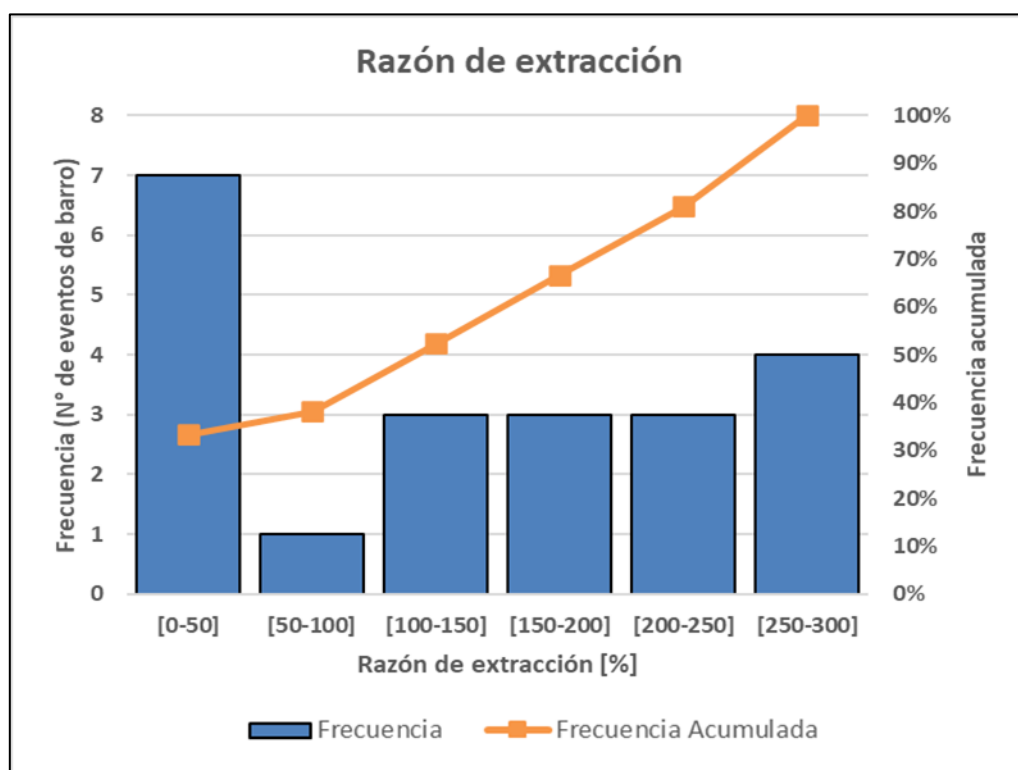


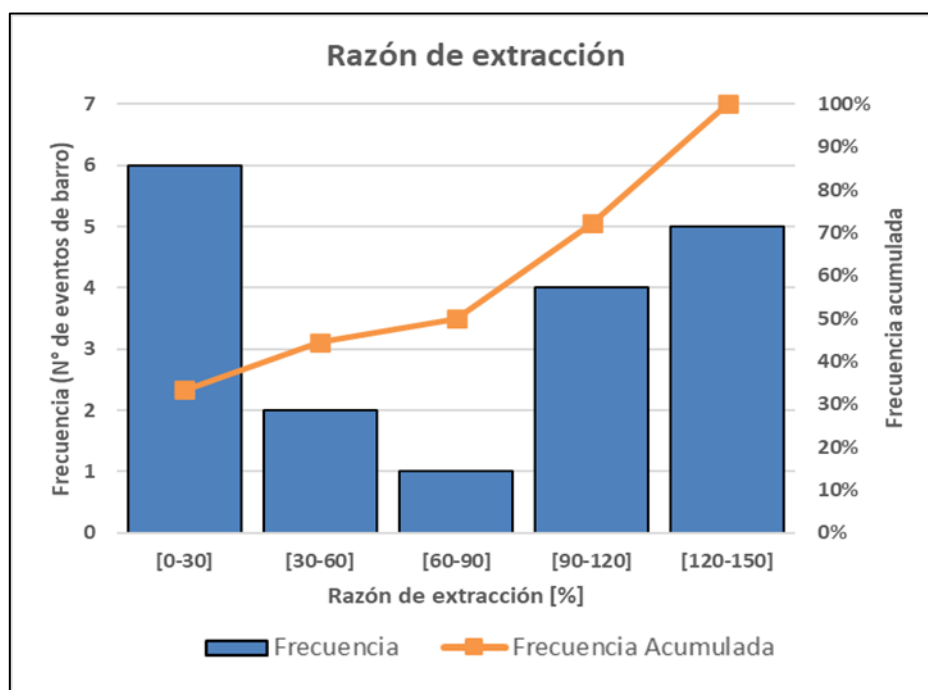
Figura 66: Distribución de razón de extracción para eventos de agua barro en Diablo Regimiento

La Tabla 39 proporciona las estadísticas básicas de la razón de extracción en Diablo Regimiento.

**Tabla 39: Resumen con estadísticas básicas de razón de extracción en Diablo Regimiento**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	140%	45%
Desviación estándar	89%	65%
Máximo	257%	276%
Mínimo	30%	0%

Para Esmeralda Bloque 1 & 2 se observa a través de la Figura 67 que el 28% de los eventos de agua barro ocurren con una razón de extracción mayor a 120%, es decir, cuando ya se ha extraído más de la totalidad de su altura de columna in-situ.



**Figura 67: Distribución de razón de extracción para eventos de agua barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 40 proporciona las estadísticas básicas de la razón de extracción en Esmeralda Bloque 1 & 2.

**Tabla 40: Resumen con estadísticas básicas de razón de extracción en Esmeralda Bloque 1 & 2**

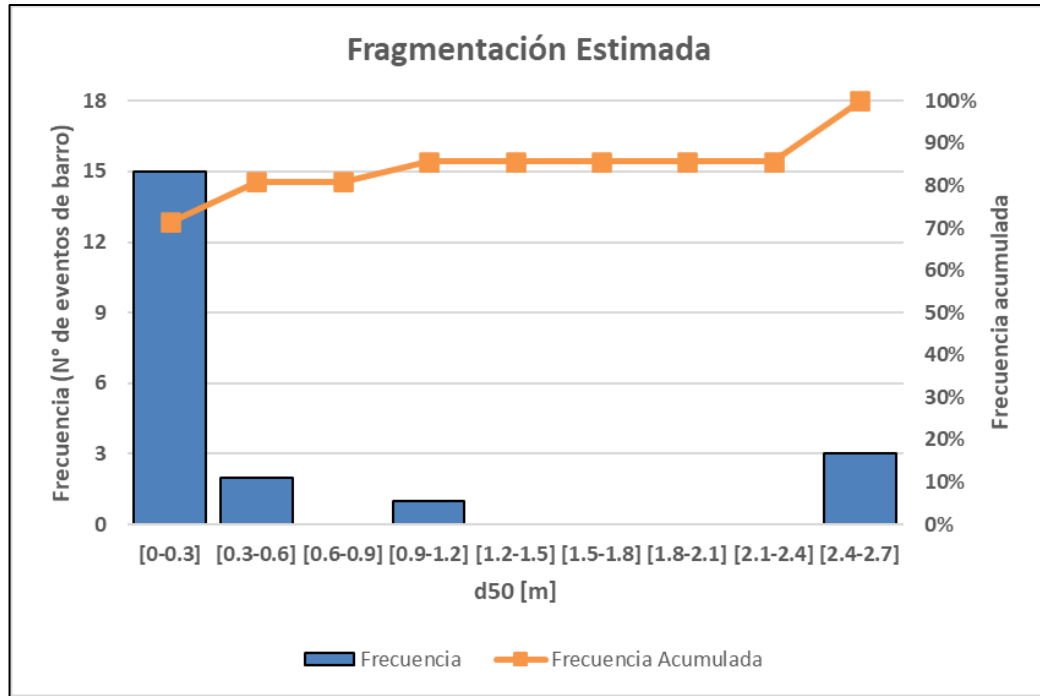
Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	77%	18%
Desviación estándar	50%	47%
Máximo	140%	0
Mínimo	16%	453%



## Análisis Fragmentación Estimada d50 [m]

Estimación de la fragmentación presente en el material extraído en un punto de extracción. En este caso se considera como indicador para la fragmentación, el d50 medido en metros.

Para Diablo Regimiento, la Figura 68 muestra la distribución de la fragmentación estimada para los PE con eventos de agua barro registrados. Se observa que el 71% de los eventos ocurren cuando la fragmentación d50 es menor a 0.3 m.



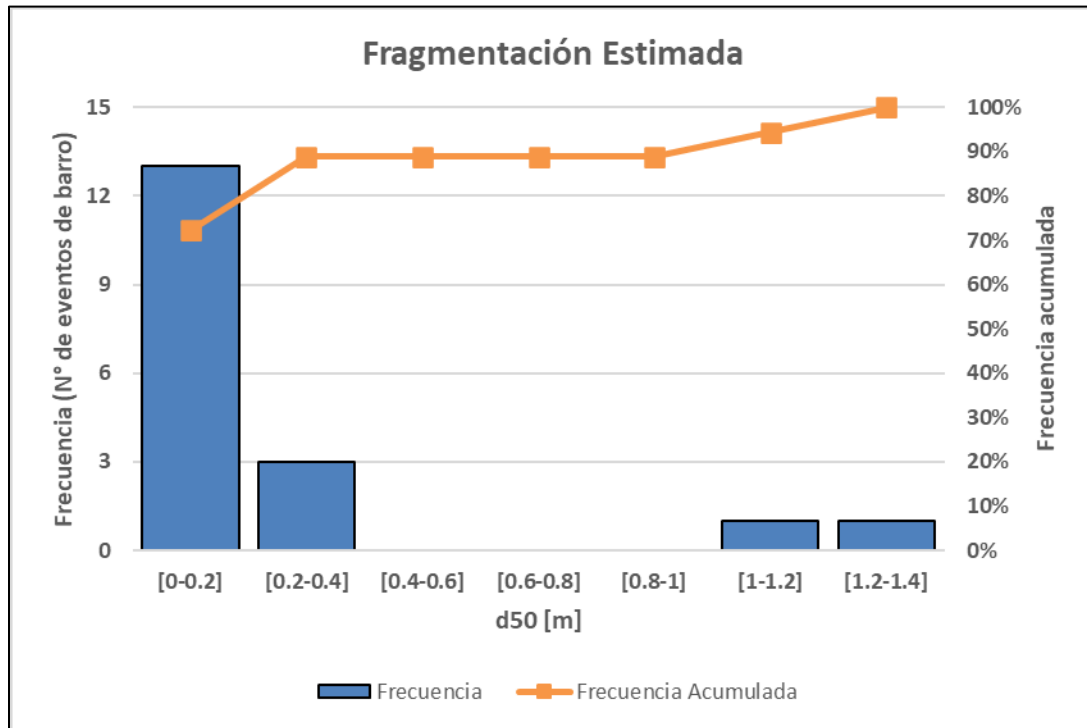
**Figura 68: Distribución Fragmentación Estimada [d50] en Diablo Regimiento**

La Tabla 41 proporciona las estadísticas básicas de la fragmentación estimada en Diablo Regimiento.

**Tabla 41: Resumen con estadísticas básicas de fragmentación estimada en Diablo Regimiento**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	0.52 m	0.46 m
Desviación estándar	0.94 m	0.45 m
Máximo	2.7 m	3.7 m
Mínimo	0.001 m	0.001 m

Para Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 69 muestra la distribución de la fragmentación estimada para los PE con eventos de agua barro registrados. Se observa que el 72% de los eventos ocurren cuando la fragmentación d50 es menor a 0.2 m.



**Figura 69: Distribución Fragmentación Estimada [d50] en Esmeralda Bloque 1 & 2**

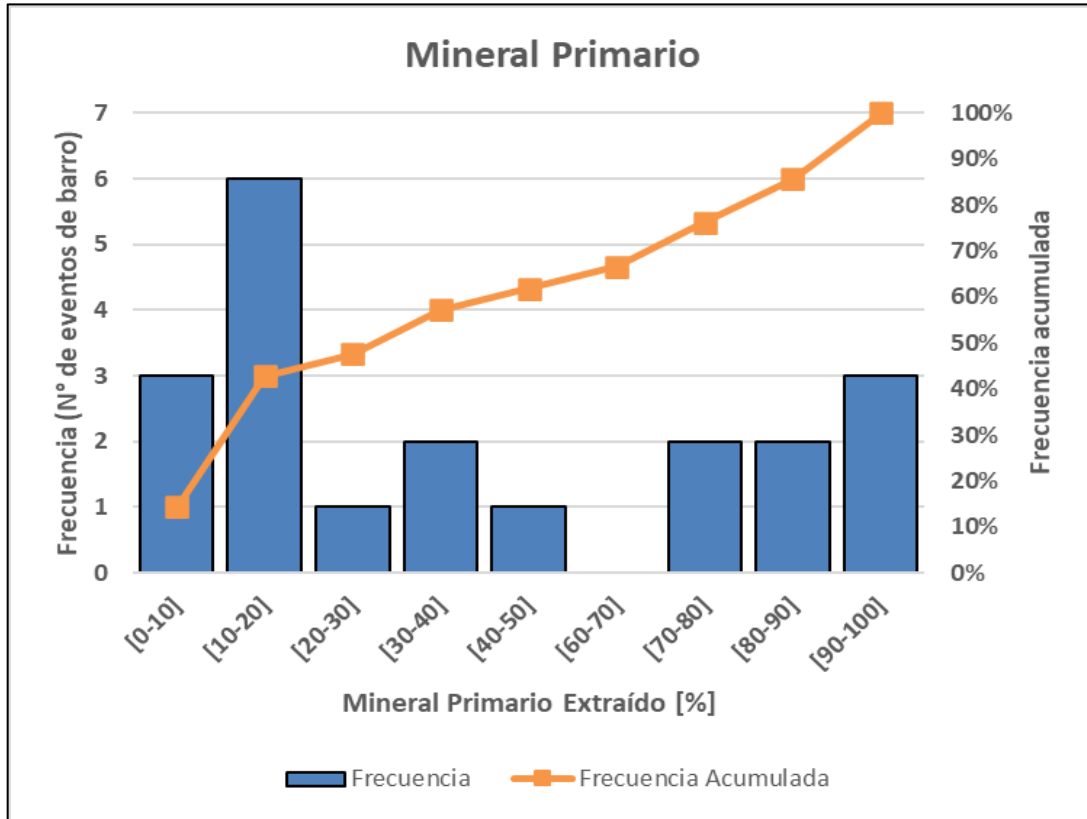
La Tabla 42 proporciona las estadísticas básicas de la fragmentación estimada en Esmeralda Bloque 1 & 2.

**Tabla 42: Resumen con estadísticas básicas de fragmentación estimada en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	0.30 m	0.75 m
Desviación estándar	0.34 m	3.86 m
Máximo	1.271 m	3.61 m
Mínimo	0.001 m	0.001 m

## Análisis Primario Extraído en PE

Para Diablo Regimiento, la Figura 70 muestra la distribución del mineral primario extraído en el PE con eventos de agua barro. Se observa que el 43% de los eventos ocurren cuando se tiene una extracción de mineral primario menor al 20%.



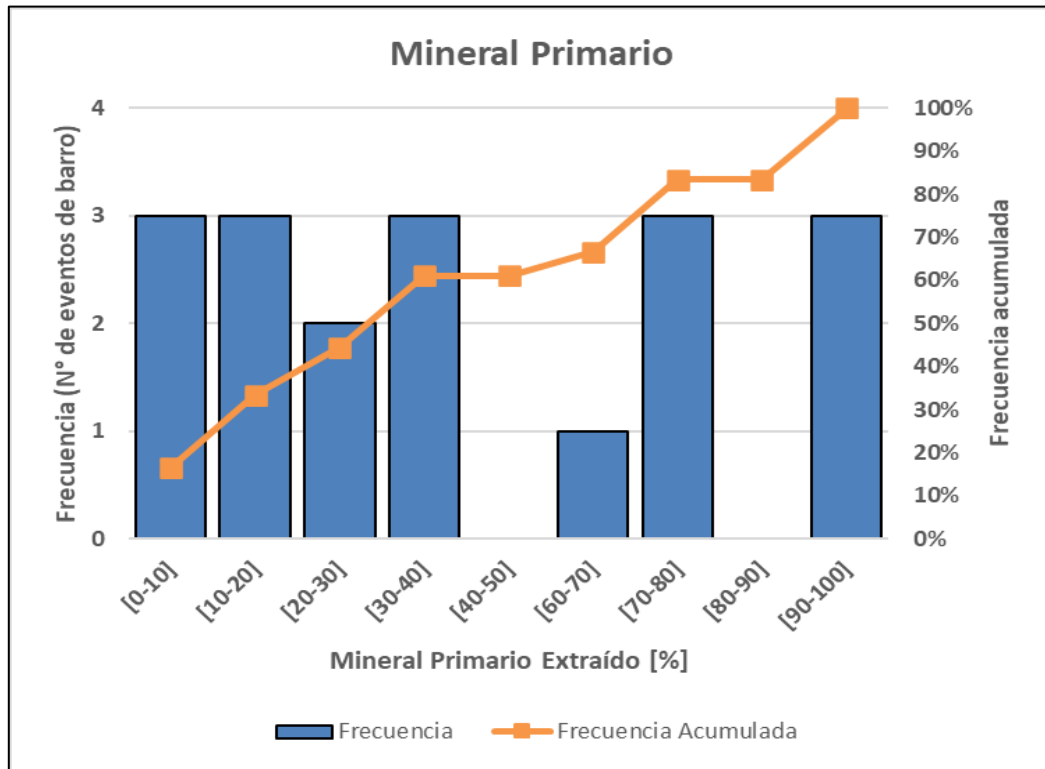
**Figura 70: Distribución de Mineral Primario en Diablo Regimiento**

La Tabla 43 proporciona las estadísticas básicas del mineral primario extraído en Diablo Regimiento.

**Tabla 43: Resumen con estadísticas básicas de Mineral Primario en Diablo Regimiento**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	43%	74%
Desviación estándar	35%	37%
Máximo	100%	100%
Mínimo	0%	0%

Para Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 71 muestra la distribución del mineral primario extraído en el PE con eventos de agua barro. Se observa que el 33% de los eventos ocurren cuando se tiene una extracción de mineral primario menor al 20%.



**Figura 71: Distribución de Mineral Primario en Esmeralda Bloque 1 & 2**

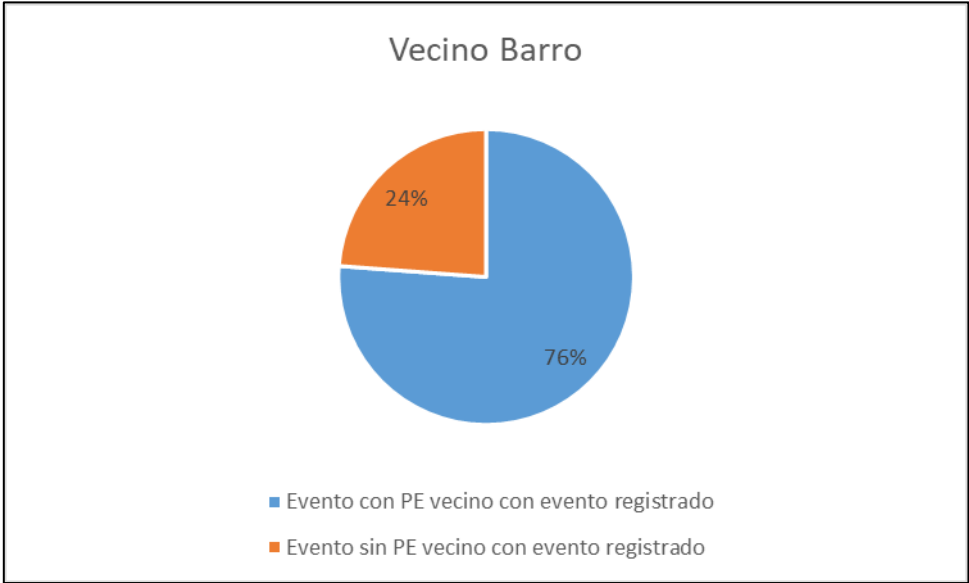
La Tabla 44 proporciona las estadísticas básicas del mineral primario extraído en Diablo Regimiento.

**Tabla 44: Resumen con estadísticas básicas de Mineral Primario en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	43%	74%
Desviación estándar	35%	37%
Máximo	100%	100%
Mínimo	0%	0%

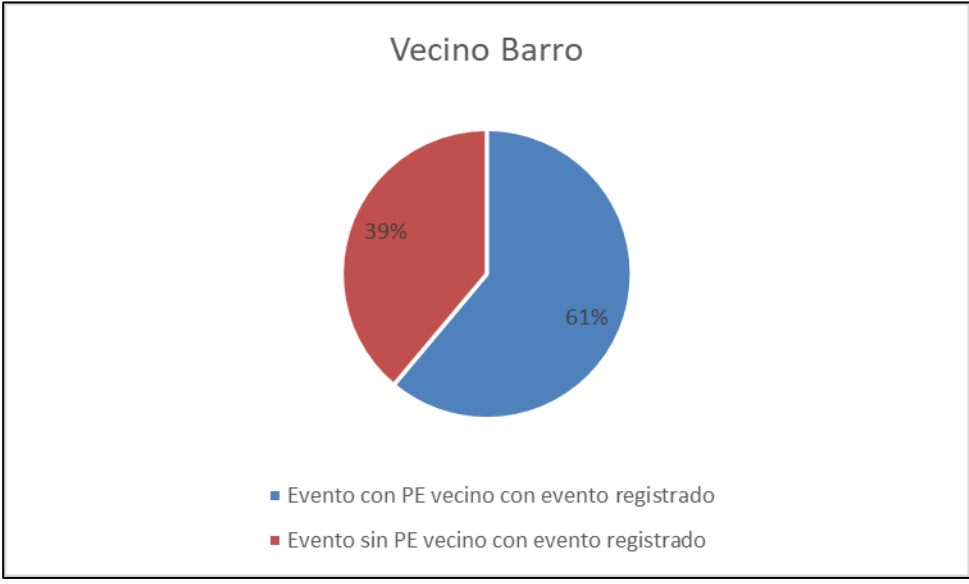
**Análisis Vecino Barro**

Para Diablo Regimiento, la Figura 72 muestra el gráfico circular de la variable vecino barro para los eventos de agua barro. Se observa que el 76% de los eventos ocurren cuando se tiene un PE vecino con un evento registrado.



**Figura 72: Gráfico circular Vecino Barro en Diablo Regimiento**

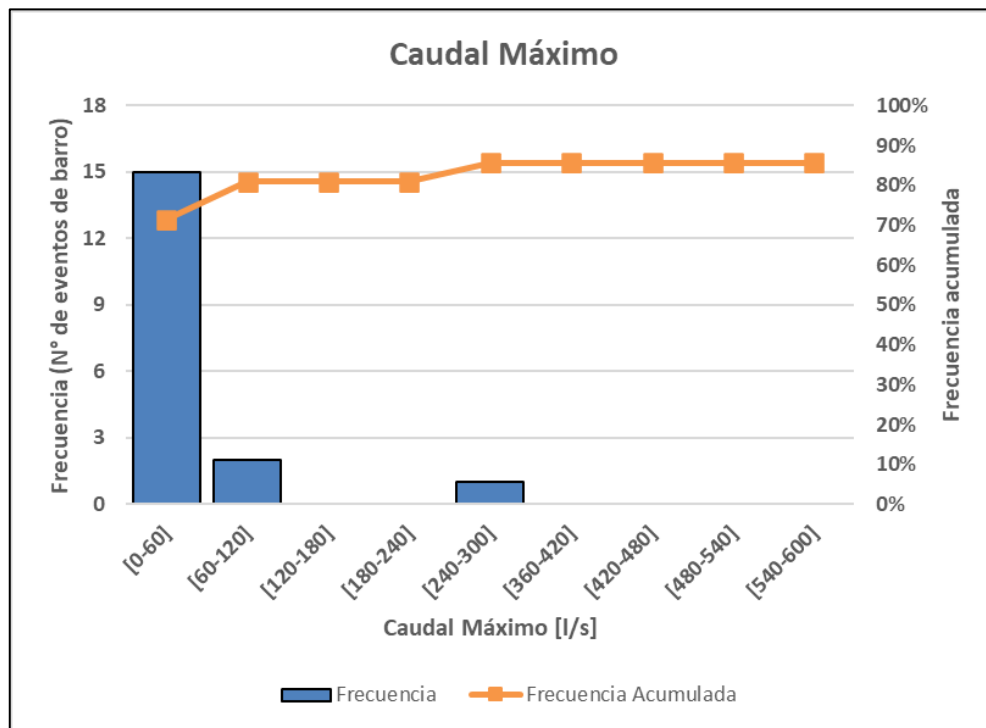
Para Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 73 muestra el gráfico circular de la variable vecino barro para los eventos de agua barro. Se observa que el 61% de los eventos ocurren cuando se tiene un PE vecino con un evento registrado.



**Figura 73: Gráfico circular Vecino Barro en Esmeralda Bloque 1 & 2**

## Análisis caudal máximo

Para Diablo Regimiento, la Figura 74 muestra la distribución del caudal máximo para los eventos de agua barro registrados. El promedio fue de 128 l/s, también se observa que el 19% de los eventos cuando el caudal máximo es mayor a 120 l/s.



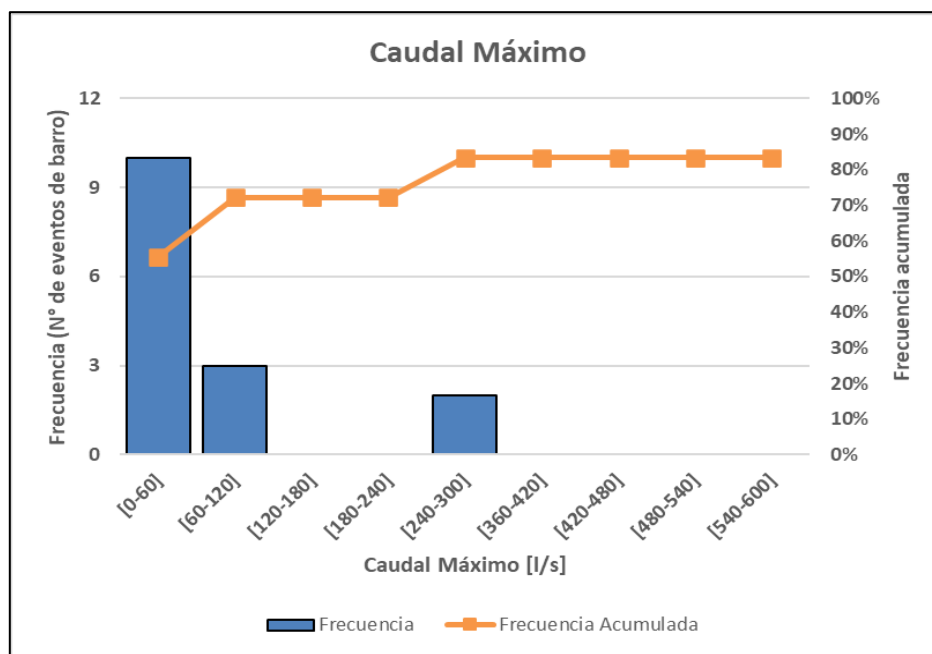
**Figura 74: Distribución de caudal máximo para eventos de agua barro en Diablo Regimiento**

La Tabla 45 proporciona las estadísticas básicas del caudal máximo en Diablo Regimiento.

**Tabla 45: Resumen con estadísticas básicas de razón de extracción en Diablo Regimiento**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	128 l/s	102 l/s
Desviación estándar	213 l/s	142 l/s
Máximo	622 l/s	924 l/s
Mínimo	5 l/s	5 l/s

Para Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 75 muestra la distribución del caudal máximo para los eventos de agua barro registrados. El promedio fue de 166 l/s, también se observa que el 28% de los eventos cuando el caudal máximo es mayor a 120 l/s.



**Figura 75: Distribución de caudal máximo para eventos de agua barro Esmeralda Bloque 1 & 2**

La Tabla 46 proporciona las estadísticas básicas del caudal máximo en Esmeralda Bloque 1 & 2.

**Tabla 46: Resumen con estadísticas básicas del caudal máximo en Esmeralda Bloque 1 & 2**

Estadísticas Básicas	PE con eventos de agua barro	PE sin eventos de agua barro
Promedio	166 l/s	59 l/s
Desviación estándar	222 l/s	146 l/s
Máximo	621 l/s	924 l/s
Mínimo	16 l/s	0 l/s

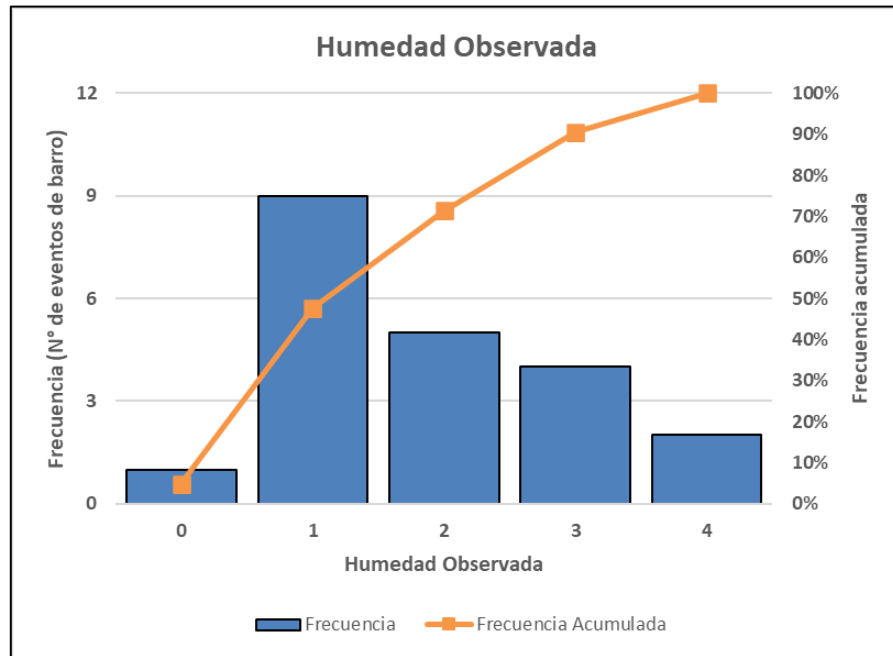
### Análisis humedad observada

División El Teniente realizó un criterio de clasificación de seis estados cualitativos de humedad, lo que permite una fácil interpretación de la humedad del material en terreno. A continuación, se pueden ver los estados de clasificación en la Tabla 47.

**Tabla 47: Clasificación de humedad observada en punto de extracción (SGP-GRL-DET, 2010)**

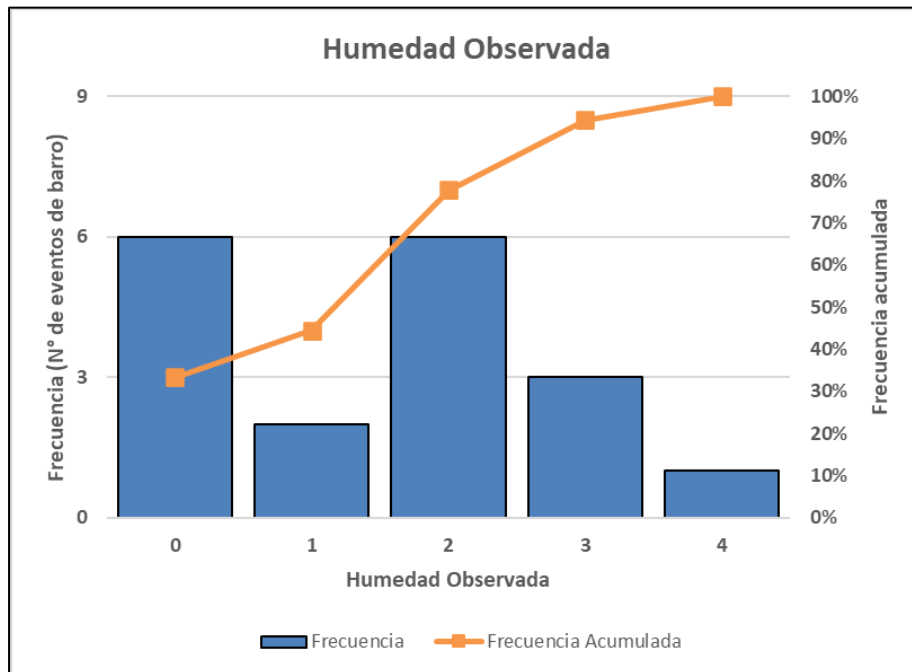
Clasificación	Nombre	Descripción
H=0	Seco	El punto de extracción se observa sin presencia de humedad.
H=1	Baja Humedad	El punto de extracción se observa con el material fino (inferior a 5 [cm]) con baja humedad y de un color más oscuro que el seco.
H=2	Humedad	El punto de extracción se observa con material húmedo.
H=3	Barro Incipiente	El punto de extracción se observa con humedad y a la vista se presenta con una textura pastosa.
H=4	Barro	El punto de extracción se observa con humedad y a la vista se presenta con una textura barroosa y presenta un brillo propio de la presencia de saturación de agua.
H=A	Agua	El punto de extracción se observa con material con una granulometría media a gruesa (superior a 25 [cm]), permitiendo que el agua se escurra sin provocar mayores complicaciones operacionales.

Para el sector de Diablo Regimiento, la Figura 76 muestra la distribución de la humedad observada de terreno, donde se observa que el 52% de los eventos ha sido clasificado sobre la categoría de H=2, es decir, en el PE se observa material con húmedo.



**Figura 76: Distribución humedad observada Diablo Regimiento**

Para el sector de Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 77 muestra la distribución de la humedad observada de terreno, donde se observa que el 56% de los eventos ha sido clasificado sobre la categoría de H=2, es decir, en el PE se observa material con humedad.

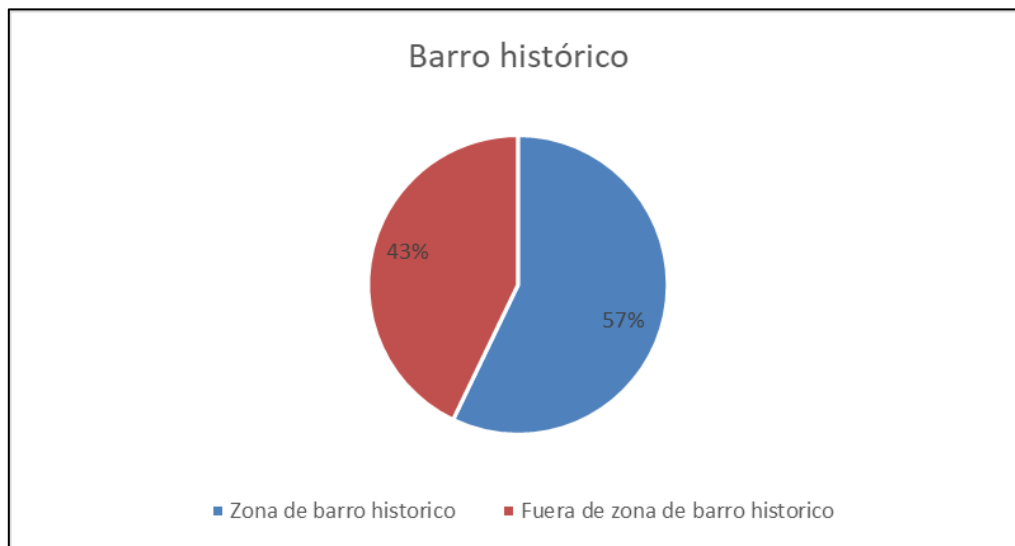


**Figura 77: Distribución humedad observada Esmeralda Bloque 1 & 2**



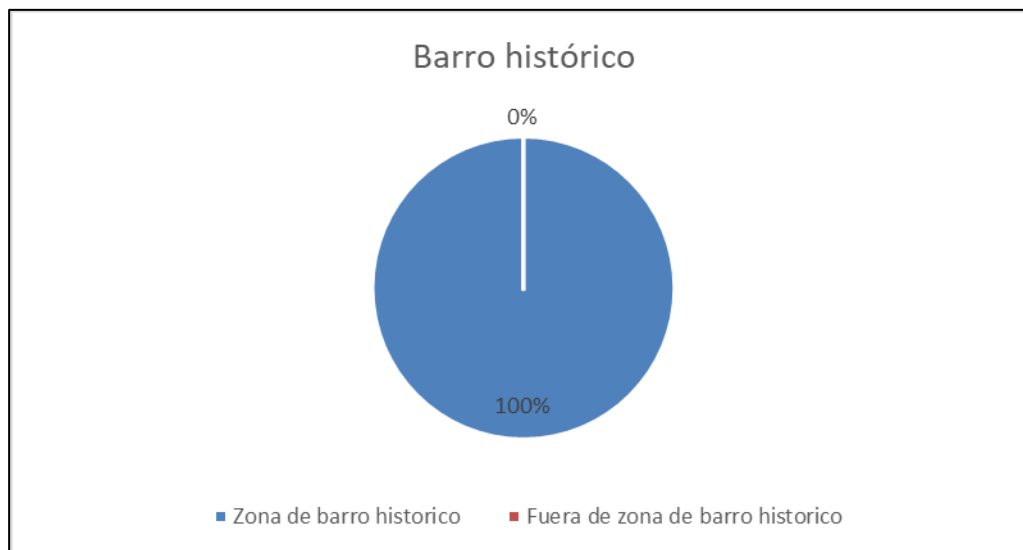
## Análisis Barro histórico

Para Diablo Regimiento, la Figura 78 muestra el gráfico circular de la variable barro histórico para los eventos de agua barro. Se observa que el 57% de los eventos ocurren en la zona de barro histórico.



**Figura 78: Gráfico circular barro histórico en Diablo Regimiento**

Para Esmeralda Bloque 1 & 2, la Figura 79 muestra el gráfico circular de la variable barro histórico para los eventos de agua barro. Se observa que el 100% de los eventos ocurren en la zona de barro histórico.



**Figura 79: Gráfico circular Vecino histórico en Esmeralda Bloque 1 & 2**

## Anexo B

### Análisis Univariante

En esta etapa, se lleva a cabo un análisis de regresión logística univariante entre cada variable independiente y la variable dependiente. Este análisis busca determinar y cuantificar si la variable independiente tiene un efecto significativo en la variable dependiente. La significancia de cada variable independiente se evalúa en este paso, y si la significancia es menor al 20%, se considera que existe correlación, y el ponderador de la variable independiente es diferente de cero. En otras palabras, se acepta con un 80% de confiabilidad que los ponderadores son distintos de cero, indicando que la variable independiente afecta al fenómeno.

El análisis univariante se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$E(Y|x) = \pi(x) = p = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1}}$$

Donde  $E(Y|x)$  es la "probabilidad de que Y tome el valor 1".  $\beta_0$  se conoce como la constante,  $\beta_i$  es el coeficiente de la variable independiente  $x_i$ ,  $i=1$ .

Tal como se mencionó anteriormente, en los modelos de regresión logística se emplean diversas variables, cada una con una ponderación única en los modelos, lo que implica una influencia diferenciada en el fenómeno de eventos de agua barro. El Odds Ratio se define como la oportunidad de que ocurra un evento dado al aumentar en una unidad una condición de riesgo. La fórmula del Odds Ratio se calcula de la siguiente manera (Hosmer, et al., 2013):

$$OR = e^{\beta_i}$$

Si  $B_i$  es mayor que 0, indica que un aumento en la variable predictora se traduce en un aumento en la probabilidad de ocurrencia del evento; por el contrario, si  $B_i$  es menor que 0, implica una disminución en la probabilidad de la ocurrencia del evento.

El análisis de regresión logística univariante es equivalente, desde el punto de vista matemático, a la prueba de independencia entre variables mediante la prueba de Chi-Cuadrado. En la prueba de Chi-Cuadrado, las hipótesis estudiadas son las siguientes:

- $H_0$ : No hay variación significativa entre las variables X e Y, son independiente
- $H_1$ : Existe variación significativa entre las variables X e Y, son dependientes

En esta prueba, se busca rechazar  $H_0$  con un 95% de confianza (significancia del 5%), lo que equivale a concluir que las variables X e Y son dependientes.

## Anexo C

### Metodología del análisis de regresión logística multivariable

Como se observó anteriormente, la regresión logística es una técnica estadística utilizada para desarrollar modelos que predicen un resultado discreto basándose en un conjunto de variables (covariables) que pueden ser continuas, discretas, dicotómicas o una combinación de estas. Una característica distintiva de la regresión logística es que no requiere que las variables predictoras sigan una distribución normal, estén linealmente relacionadas con la variable dependiente o tengan varianzas iguales en cada grupo. En otras palabras, los predictores pueden consistir en una combinación de variables continuas, discretas y dicotómicas. Este enfoque flexible hace que la regresión logística sea particularmente útil en situaciones donde las variables predictoras pueden tener diferentes características y escalas de medición.

El modelo de regresión logística debe ser lo más conciso posible para explicar los datos, siguiendo el principio de parsimonia. Además, debe ser consistente y fácilmente interpretable. Es crucial incluir todas las variables consideradas importantes para el modelo, sin importar si un análisis univariable previo mostró significancia estadística. De esta manera, la regresión logística delinearé la asociación entre la variable de respuesta dicotómica, Y (evento o no evento de agua barro), y x, la colección de variables relacionadas con el fenómeno de ocurrencia de eventos de agua barro.

Un modelo de regresión logística sigue la siguiente estructura:

$$E(Y|x) = \pi(x) = p = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n}}$$

Donde  $E(Y | x)$  es la "probabilidad de que Y tome el valor 1".  $\beta_0$  se conoce como la constante,  $\beta_i$  son los coeficientes de las variables independientes  $x_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . Una transformación importante en términos de  $\pi(x)$  se conoce como la transformación logit:

$$g(x) = \ln \left[ \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n$$

$$p = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n}}$$

$\beta_i$ ,  $i = 1 \dots n$ : coeficientes asociados con cada una de las variables independientes.

$x_i$ ,  $i = 1 \dots n$ : variables independientes.

$p$ : probabilidad de ocurrencia. Valores entre 0 y 1

## Anexo D

### Calibración Modelamiento Multivariable

La calibración de los modelos construidos se llevó a cabo al comparar los datos reales de eventos de agua barro con las predicciones generadas por el modelo mediante el uso de un valor de probabilidad de corte (CP). Este valor de probabilidad de corte permitió clasificar los puntos de extracción en una de las dos categorías de respuesta, es decir, 1 o 0, utilizando diversos niveles de probabilidad. La probabilidad de corte se define como el valor mínimo de probabilidad para el cual un punto de extracción se clasifica con riesgo de ocurrencia de evento de agua barro.

Con los resultados de la probabilidad de corte, se construyó una tabla de contingencia (Tabla 48) que permitió el cálculo de cuatro posibles resultados. Por un lado, si el valor real es positivo y se clasifica como positivo, entonces se cuenta como un verdadero positivo (VP); de lo contrario, se cuenta como falso negativo (FN). La simbología utilizada en la matriz de confusión es la siguiente (Witten, et al., 2017):

**Tabla 48: Matriz de confusión o tabla de contingencia.**

		Valor Predicho	
		<i>Positivos</i>	<i>Negativos</i>
Observación Real	<i>Positivos</i>	Verdadero Positivo (VP)	Falso Negativos (FN)
	<i>Negativos</i>	Falso Positivos (FP)	Verdadero Negativo (VN)

Para evaluar la tabla de contingencia, la probabilidad de corte permite el cálculo de tres KPI de desempeño principales, con el objetivo de maximizar estos indicadores de predicción descritas por Witten, et al., 2017:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{VP+FN} * 100$$

$$\text{Precisión} = \frac{VP}{VP+FP} * 100$$

$$\text{Exactitud} = \frac{VP+VN}{VP+FP+FN+VN} * 100$$

Donde:

- **Sensibilidad:** Mide la proporción de verdaderos positivos en relación con todos los casos positivos, en este caso los PE con eventos de agua barro.
- **Precisión:** Proporciona la cantidad de predicciones positivas correctas (PE con eventos de agua barro) con respecto a todas las predicciones positivas realizadas por el modelo.
- **Exactitud:** Indica la capacidad del modelo de acertar a los casos positivos y negativos, es decir, de forma correcta los puntos que presentan y no presentan eventos de agua barro.

