



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MULTIVARIABLES DE RIESGO AL INGRESO DE DILUCIÓN EN MINERÍA DE CAVING

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

MARCOS ANTONIO CIFUENTES NAVARRO

PROFESORA GUÍA:

MARÍA ELENA VALENCIA VERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAÚL CASTRO RUIZ

PABLO PAREDES MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Marcos Antonio Cifuentes Navarro
FECHA: 31 de marzo de 2017
PROFESORA GUÍA: María Elena Valencia Vera

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MULTIVARIABLES DE RIESGO AL INGRESO DE DILUCIÓN EN MINERÍA DE CAVING

Métodos de explotación mineros como el Block y Panel Caving implican una serie de riesgos y peligros que podrían afectar su envolvente económica. La entrada temprana de dilución en los puntos de extracción es uno de los principales riesgos asociados a los objetivos productivos en las operaciones de caving, desencadenando en una disminución de ingresos o pérdidas de reservas de mineral. A pesar de esto, las principales herramientas utilizadas para su control en la actualidad son insuficientes y presentan bajas confiabilidades, además de ser orientadas hacia el largo plazo.

En consecuencia, el objetivo principal del presente trabajo de memoria recae en la creación de una nueva metodología y modelos para determinar el riesgo de entrada de dilución en puntos de extracción para un horizonte operacional y bajo condiciones tanto operaciones como de entorno. Lo anterior desarrollado a partir de una base datos del Panel III de Andina, Codelco.

A través de los análisis de mecanismos de ingreso de dilución se determina un ingreso vertical seguido de uno lateral, además de un modelo mixto. A partir de esto, se desarrollan tres modelos multivARIABLES de riesgo al ingreso de dilución acumulada al 3%. Los resultados principales indican una relevancia estadística en el evento por parte de las variables estado de los vecinos (con o sin presencia de dilución), columna extraída, altura de columna y uniformidad de los últimos 30 días.

El modelo generalizado muestra los mejores indicadores de capacidad predictiva. Simulaciones realizadas permiten obtener un error promedio de 10.2 kton, además de una confiabilidad y exactitud alrededor de 86% y 90% respectivamente, lo que junto a otros análisis permite inferir que el modelo tiene una alta capacidad predictiva y un comportamiento conservador. Además, el modelo muestra un mejor desempeño que el observado por simulaciones en Rebop (Armijo 2013).

Finalmente, se concluye de forma principal que en escenarios como el del Panel III de Andina, el modelo resultante se proyecta como una herramienta eficaz para determinar el riesgo a la entrada de dilución y llevar a cabo planificación minera a corto plazo, permitiendo anticipar eventos dilución acumulada en la extracción. No obstante, se requieren pruebas adicionales con datos de otras minas para evaluar la generalización del uso de este modelo en la predicción del ingreso de dilución ante condiciones diferentes a las estudiadas en el presente trabajo de memoria.

**ABSTRACT OF THESIS SUBMITTED TO OPT
FOR THE DEGREE OF: Mining Engineer
BY: Marcos Antonio Cifuentes Navarro
DATE: March, 31th, 2017
GUIDANCE PROFESSOR: María Elena Valencia Vera**

CONSTRUCTION OF MULTIVARIABLE MODELS OF DILUTION ENTRY RISK FOR CAVE MINING

Mining methods such as Block and Panel Caving involve a few risks and hazards that could affect their economic envelope. Early entry dilution in drawpoints is one of the principal risks associated to production goals in caving operations, triggering a decrease in revenues or losses of mineral reserves. Despite this, the main tools currently used for its control are insufficient and present low reliabilities, being these oriented towards the long term or grade prediction for planning.

In consequence, the aim of this work is to create a new methodology and predictive models to determine the entry dilution risk at drawpoints for an operational horizon and under both operating and environmental conditions. This developed from a database of Panel III de Andina, Codelco.

Through the analysis of dilution entry mechanisms for the drawpoints and their geometric neighbors, a vertical entry followed by a lateral one is determined, in addition to a mixed model that contemplates the previous ones. From this, three multivariate risk models are developed at the entry of accumulated dilution to 3%, determined based on the mechanisms. The main results obtained indicate a statistical relevance in the phenomenon by the variables associated with the state of the neighbors (with or without presence of dilution), extracted column, column height and uniformity presented by the point and its neighbors during the last 30 days.

The generalized model shows the best indicators of predictive capacity. The simulations carried out using the generalized model allows to obtain that in the case of a calibration around the minimization of error in the tonnages, the model delivered an average error of 10.2 kton and 2.7 months, besides a reliability and accuracy around 86% and 90% respectively, which together with other analysis allows to infer that the model has a high predictive capacity and a conservative behavior. Furthermore, the model shows a better performance than observed by Rebop simulations.

It is mainly concluded that in scenarios such as the Panel III, the resulting model is projected as an effective tool to determine the dilution risk and to carry out short-term mine planning, allowing to anticipate events of accumulated dilution in the extraction. However, additional testing is required with data from other mines to assess the widespread use of this model in the determination of the dilution entry risk under different conditions to those evaluated in the present work.

*Queda prohibido no crear tu historia,
no tener un momento para la gente que te necesita,
no comprender que lo que la vida te da, también te lo quita.*

*Queda prohibido no buscar tu felicidad,
no vivir tu vida con una actitud positiva,
no pensar en que podemos ser mejores,
no sentir que sin ti este mundo no sería igual.*

Ismael Navarro D.

Francisca Villalobos B.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, no puedo comenzar sin agradecer a la persona por quien hasta ahora he sido capaz de lograr cada una de las metas que me he propuesto. Gracias mamá por tu amor y apoyo infinito, además de cada uno de los esfuerzos que has hecho por mí. También, quiero agradecer a mis hermanos Tomas y Cristóbal, por su gran cariño y comprensión. Además, no puedo dejar fuera a mi mami Lidia, gracias por su preocupación, formación, cuidarme y quererme desde siempre.

A mi profesora guía, María Elena, gracias por confiar en mí y aceptarme como alumno memorista. Además, agradezco enormemente la excelente disposición para ayudar, guiarme, enseñar, responder consultas y la gran simpatía.

A mis profesores integrantes de comisión, Dr Raúl Castro y Pablo Paredes, por su afán en generar conocimientos, ayuda y disposición desde el primer momento.

A mis compañeros y amigos de universidad. Particularmente gracias a ustedes: Sergio, Raúl, Fernando, Eduardo, Bruno, Manuel, Pedro, Leandro y Héctor; por haber sido imprescindibles en esta etapa, además de cada uno de los grandes momentos, trabajos, horas de estudios y risas.

A mis grandes amigos de toda la vida: Horacio, Pablo, Luis, Negro, Cristián y Lissette; gracias por todo, especialmente por las alegrías a pesar de la distancia.

A cada uno de los compañeros del BC Laboratorio, particularmente a Diego por tener siempre una buena disposición para explicar y ayudar. Además, gracias a Lenin, Sebastián, Juan P, Armijo, Yina, Vanessa y David, por la simpatía, apoyo y buenos momentos.

A cada una de las personas que me han acompañado y apoyado a lo largo de estos 6 años de universidad. Particularmente a mis tíos y primos, gracias a ustedes: Maritza, Carlos, Francisco, Ricardo, Leonardo y Cesar.

Finalmente, gracias a mis perritos Zeus, Tita y Sofi. Por ser mis grandes alegrías y darme las mejores bienvenidas ante cada regreso a casa.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación del trabajo.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Alcances.....	3
1.5. Metodología de trabajo.....	4
1.6. Contenidos del trabajo de memoria.....	5
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Teoría del comportamiento de la dilución.....	6
2.2.1. Elementos que influyen en la entrada y comportamiento de la Dilución.....	6
2.2.2. Modelo de comportamiento de dilución de Laubscher.....	8
2.2.3. Modelo de Susaeta.....	12
2.2.4. Mecanismos de entrada de dilución.....	16
2.3. Herramientas de simulación como método de predicción.....	20
2.3.1. Herramientas actualmente empleadas.....	20
2.3.2. Métricas de clasificación por matrices de contingencia.....	20
2.3.3. Estudios con herramientas actuales.....	22
2.4. Regresión Logística.....	26
2.4.1. Fundamentos de las Regresiones Logísticas.....	27
2.4.2. Ajuste de Regresión Logística.....	28
2.4.3. Odds Ratio.....	29
2.4.4. Análisis ROC.....	29

2.4.5. Usos actuales de Regresión logística.....	30
2.5. Conclusiones del capítulo	31
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	33
3.1. Introducción.....	33
3.2. Metodología.....	33
Etapa 1: Back Análisis	35
Etapa 2: Preparación de base de datos. Construcción, calibración y validación.....	35
Etapa 3: Análisis y recomendaciones.....	38
3.3. Conclusiones del capítulo	39
CAPÍTULO 4: BACK ANÁLISIS.....	40
4.1. Introducción.....	40
4.2. Estudio exploratorio de base de datos.....	40
4.2.1. Descripción de base de datos.....	40
4.2.2. Análisis de entrada de dilución en el Cluster Parrillas	42
4.2.3. Análisis de entrada de dilución en el Cluster LHD	45
4.2.4. Hipótesis de ingreso de dilución.....	49
4.2.5. Variables de los modelos.....	51
4.3. Conclusiones del capítulo	58
CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MULTIVARIABLES	59
5.1. Introducción.....	59
5.2. Preparación de base de datos	59
5.3. Construcción de modelos.....	60
5.3.1. Modelo Generalizado, Cluster LHD.....	62
5.3.2. Modelo de Mecanismo Vertical, Cluster LHD.....	63
5.3.3. Modelo de Mecanismo Lateral, Cluster LHD	64
5.4. Calibración de modelos	66

5.4.1.	Modelo Generalizado, Cluster LHD.....	67
5.4.2.	Modelo Interactivo, Cluster LHD.....	68
5.5.	Validación de modelos.....	70
5.5.1.	Modelo Generalizado, Cluster LHD.....	70
5.5.2.	Modelo Interactivo Cluster LHD.....	71
5.6.	Conclusiones del capítulo	76
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
6.1.	Conclusiones generales.....	77
6.2.	Conclusiones de modelos multivariables.....	78
6.3.	Recomendaciones y trabajos futuros	79
BIBLIOGRAFÍA		81
ANEXO A		83
ANEXO B		87
ANEXO C		90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología general de trabajo de memoria.....	4
Figura 2. Fenómeno de Rilling. DeWolfe, 1981.	8
Figura 3. Altura de Interacción. Laubscher, 1994.	9
Figura 4. Factor de Control de Tiraje (DFC). Laubscher, 1994.	10
Figura 5. Ejemplo de Modelo de Mezcla de Laubscher.	11
Figura 6. Comportamientos de dilución según modelo de flujo, adaptado de Susaeta (2004). Paredes, 2012.....	14
Figura 7. Relación entre el I.U y el Pedza para el sector de Parrillas de Andina. Susaeta, 2004..	16
Figura 8. Perfiles de secuencia de mecanismos de ingreso de dilución vertical. Paredes, 2012...	17
Figura 9. Perfiles de secuencia de mecanismos de ingreso de dilución lateral. Paredes, 2012....	18
Figura 10. Secuencia de eventos de colapso y air blast al comienzo de la secuencia. De Nicola y Fishwick, 2000.	18
Figura 11. Vista en planta de la ubicación espacial de los clusteres de dilución. Paredes, 2012.	19
Figura 12. Matriz de Contingencia.	20
Figura 13. Inca Central Oeste: Resultados Matriz de contingencia según punto de extracción. Valencia, 2013.....	23
Figura 14. Comparación PED medio entre FlowSim, Rebo y datos mina. Valencia, 2013.	23
Figura 15. Comparación de Desviación Estándar del PED con error cuadrático medio entre FlowSim, Rebo y datos mina. Valencia, 2013.	24
Figura 16. Ejemplo de Curva ROC.	30
Figura 17. Clusteres de dilución y vista en planta de los puntos de extracción del Panel II de Andina. Paredes, 2012.....	34
Figura 18. Construcción de base de datos para eventos raros.	36
Figura 19. Pasos para la construcción de modelos.	38
Figura 20. Vista Isométrica. Disposición de clusteres y elementos diluyentes, Panel III Andina.	41
Figura 21. Vista en planta de secuencia de extracción del Panel III de Andina. Paredes, 2012. ..	42
Figura 22. Dilución promedio Cluster Parrillas.....	43
Figura 23. Histograma dilución acumulada, Parrillas.	44
Figura 24. Secuencia de explotación y entrada de dilución acumulada (3%), Parrillas.....	45
Figura 25. Dilución promedio Cluster LHD.....	46
Figura 26. Histograma dilución acumulada, LHD.	47

Figura 27. Secuencia de explotación y entrada de dilución acumulada (3%), LHD.....	48
Figura 28. Alturas de columna al momento de iniciar la explotación en los clústeres de dilución en estudio.....	48
Figura 29. Interacción de modelo vertical y lateral ante ingreso de dilución.....	50
Figura 30. Alturas de columna, Parrillas.....	52
Figura 31. Alturas de columna, LHD.....	53
Figura 32. Evolución de vecinos diluidos Parrillas y LHD.....	54
Figura 33. Porcentaje de columna extraída al ingreso de dilución, Parrillas y LHD.....	55
Figura 34. Velocidades promedio de extracción, sectores Parrillas y LHD.....	56
Figura 35. Uniformidad promedio por punto, sectores Parrillas y LHD.....	57
Figura 36. Calibración teórica modelo generalizado, LHD.....	67
Figura 37. Errores y nube de dispersión del modelo generalizado, Cluster LHD.....	68
Figura 38. Calibración teórica vertical y lateral, LHD.....	69
Figura 39. Errores y nube de dispersión del modelo interactivo, Cluster LHD.....	70
Figura 40. Tonelajes extraídos al punto de entrada de dilución acumulada (3%), dato real LHD.....	73
Figura 41. Tonelajes extraídos y diferencias al punto de entrada de dilución acumulada (3%), modelos LHD.....	74
Figura 42. Gráfica de riesgo de dilución acumulada al 3%.....	75
Figura 43. Comportamiento dilución acumulada LHD.....	83
Figura 44. Comportamiento dilución acumulada Parrillas.....	84
Figura 45. Histogramas de ingreso de dilución según mecanismo, LHD.....	85
Figura 46. Curva de porcentaje de eventos para cada variable independiente de los modelos.....	87
Figura 47. Curva ROC modelo generalizado.....	89
Figura 48. Curva ROC modelo vertical y asilado.....	89
Figura 49. Secuencia de ocurrencia de eventos simulados, Cluster LHD.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros que afectan la dilución según Laubscher (2000).	7
Tabla 2. Matriz de Uniformidad, adaptada de Susaeta (2004).	15
Tabla 3. Sectores de Andina y Mecanismos de entrada de entrada de dilución.	19
Tabla 4. Simulaciones Paredes (2012).	22
Tabla 5. Simulaciones Armijo (2013).	24
Tabla 6. Análisis crítico de métodos empleados para estimar la dilución.	25
Tabla 7. Variables independientes y su tipo para el fenómeno en estudio.	31
Tabla 8. Comportamientos esperados de las variables.	32
Tabla 9. Descripción de Información recolectada por Paredes (2012).	34
Tabla 10. Número de puntos por sector a analizar.	42
Tabla 11. Estadísticas de extracción Parrillas.	43
Tabla 12. Resumen de ingreso de dilución acumulada (3%) para Parrillas.	44
Tabla 13. Estadísticas de extracción LHD.	45
Tabla 14. Resumen de ingreso de dilución acumulada (3%) para LHD.	46
Tabla 15. Número de ocurrencia de eventos por modelo.	50
Tabla 16. Alturas de columna, Parrillas.	52
Tabla 17. Alturas de columna, LHD.	53
Tabla 18. Variables a analizar en la construcción de modelos.	58
Tabla 19. Análisis univariable, resumen modelo generalizado.	60
Tabla 20. Análisis univariable, resumen modelo vertical.	61
Tabla 21. Análisis univariable, resumen modelo lateral.	61
Tabla 22. Variables modelo generalizado.	63
Tabla 23. Variables modelo vertical.	64
Tabla 24. Variables modelo lateral.	64
Tabla 25. Odds Ratio para variables de los modelos.	65
Tabla 26. Resumen de Modelos.	66
Tabla 27. Calibración teórica modelo generalizado, IHD.	67
Tabla 28. Calibraciones modelo generalizado.	68
Tabla 29. Calibración teórica modelo generalizado, LHD.	69
Tabla 30. Calibraciones modelo interactivo.	69
Tabla 31. Ingreso de dilución modelo generalizado y datos mina, LHD.	71

Tabla 32. Comparación modelo generalizado y simulaciones Rebop.....	71
Tabla 33. Ingreso de dilución modelo interactivo y datos mina, LHD.	72
Tabla 34. Comparación modelo interactivo y simulaciones Rebop.	72
Tabla 35. Matriz de uniformidad adaptada de Susaeta.....	85
Tabla 36. Resumen de estadísticas de variables Cluster LHD.	86
Tabla 37. Calibración en torno a tonelajes, modelo generalizado.....	90
Tabla 38. Errores modelo generalizado.....	91
Tabla 39. Calibración en torno a tonelajes, modelo interactivo.	91
Tabla 40. Errores modelo interactivo.	92

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La minería de caving, específicamente aquellas minas explotadas vía Block/Panel Caving, ha presentado un desarrollo importante en las últimas décadas, captando así un gran número de proyectos e inversiones. Lo anterior, debido a los nuevos y más estrictos planes medioambientales que regulan en distintos países mineros, al aumento de operaciones que pasan por una etapa de transición de explotación vía cielo abierto hacia subterránea, y a la elección de implementación de estos métodos producto de sus bajos costos de operación y altas capacidades productivas. Los bajos costos y altas capacidades productivas son consecuencia de la masividad del método y de la utilización de la gravedad como principal medio de fragmentación de roca y transporte de la misma.

La extracción de mineral en ocasiones también incluye la extracción de material no económico, el cual es conocido como dilución. La dilución corresponde a una parte integral de una operación minera como el Block/Panel Caving, y su comportamiento desencadena en implicancias relevantes para todas las etapas de un proyecto minero subterráneo de esta índole, estando involucrada en aspectos que van desde la definición de reservas y diseño minero, hasta el control de tiraje y seguridad de la operación. Así, el control de entrada de dilución corresponde a uno de los principales problemas y desafíos de la minería hundimiento, esto dado al alto impacto que genera en términos del beneficio económico asociado, implicando muchas veces en que se incurra en retornos menores a los esperados ante su mala estimación o control.

Para abarcar el problema anterior, la literatura indica la existencia de diferentes herramientas que permiten llevar a cabo una estimación de la dilución, tales como métodos empíricos y numéricos. Los métodos numéricos permiten modelar ciertas situaciones o fenómenos físicos, transformándolos en poderosas herramientas para la simulación y evaluación de diferentes condiciones en minería (por ejemplo: Rebop, FlowSim, PCBC). Sin embargo, estos métodos están orientados para el largo plazo y una predicción de la ley bajo el marco de la elaboración de un plan de producción. En consecuencia, el presente trabajo de memoria plantea desarrollar una herramienta que indique, en base a condiciones operacionales y de entorno, la probabilidad de ingreso de dilución según las condiciones de cada punto en un período de tiempo determinado.

1.2. Motivación del trabajo

Métodos de explotación mineros como el Block y Panel Caving, desarrollados tanto en Chile como en todo el mundo, implican una serie de riesgos y peligros que podrían afectar su envolvente económica. La entrada temprana de dilución en los puntos de extracción es uno de los principales riesgos asociados a los objetivos de producción en las operaciones de caving. Así, se estima que un aumento de un 10% de dilución implica aproximadamente un 16% menos de flujo de caja anual, esto a causa de una disminución en los ingresos o una importante pérdida de reservas de mineral. Es así como el control de la entrada de dilución corresponde a uno de los principales desafíos de la minería hundimiento.

Los métodos actuales para abordar esta problemática están orientados hacia el largo plazo y para la predicción de la ley en el marco de la elaboración de un plan de producción. En consecuencia, se plantea que la creación de una nueva metodología para determinar el riesgo de entrada de dilución, bajo un horizonte operacional y a partir de información obtenida en terreno, corresponde a una forma alternativa de abordar el desafío del fenómeno de la dilución. Esta metodología se basa en la utilización de métodos estadísticos multivariantes, y presenta como objetivo crear una herramienta eficaz y práctica, a partir de la cual se espera generar una mejor evaluación del riesgo a la entrada de dilución, ayudando a tomar decisiones a escala operacional bajo la consideración de las condiciones operacionales y de borde que impone la explotación.

En síntesis, el resultado práctico de este trabajo de investigación es el desarrollo de una herramienta que indique, en base a condiciones operacionales y de entorno, la probabilidad de ingreso de dilución según las condiciones estimadas o actuales de cada punto de extracción en un período de tiempo determinado.

1.3. Objetivos

Los objetivos generales y específicos de esta investigación son los que se enlistan a continuación.

1.1.1. Objetivo general

Generación de una metodología que permita determinar el riesgo a la entrada de dilución a partir de un conjunto de variables y bajo un enfoque de planificación a corto plazo en minería de Panel Caving.

1.1.2. Objetivos específicos

Para llevar a cabo el objetivo general, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Determinar y obtener las variables que influyen en el fenómeno de entrada de dilución.
- Identificar mecanismos de ingreso de dilución a los puntos de extracción.
- Llevar a cabo la construcción, calibración y validación de los modelos mediante la base de datos de trabajo.
- Determinar la versatilidad del uso de modelos de riesgo aplicados a una escala operacional en el cálculo del riesgo a la entrada de dilución.

1.4. Alcances

Los alcances que delimitan y definen el trabajo a realizar durante el desarrollo de la memoria son los siguientes:

- La base de datos a utilizar es proporcionada por Codelco y corresponde a una colección de datos del Panel III de Andina, operada por Panel Caving. Dicha información es utilizada para determinar variables, construir modelos y posteriormente validarlos. Junto a esto, se asume que la base de datos con la cual se trabaja es fidedigna, representativa, adecuada y correcta.
- Se proponen modelos para cada sector identificado, los cuales se diferencian por sus condiciones geológicas y de operación. La herramienta predictiva analítica se basa en regresión logística multivariable.
- Los modelos desarrollados contemplan solo variables que pueden ser conseguidas a partir de la base de datos proporcionada, teniendo como consecuencia que el desarrollo del modelo puede no contemplar todas las variables de posible interés.

1.5. Metodología de trabajo

La metodología general planteada en el siguiente esquema presenta como propósito cumplir con los objetivos antes mencionados.

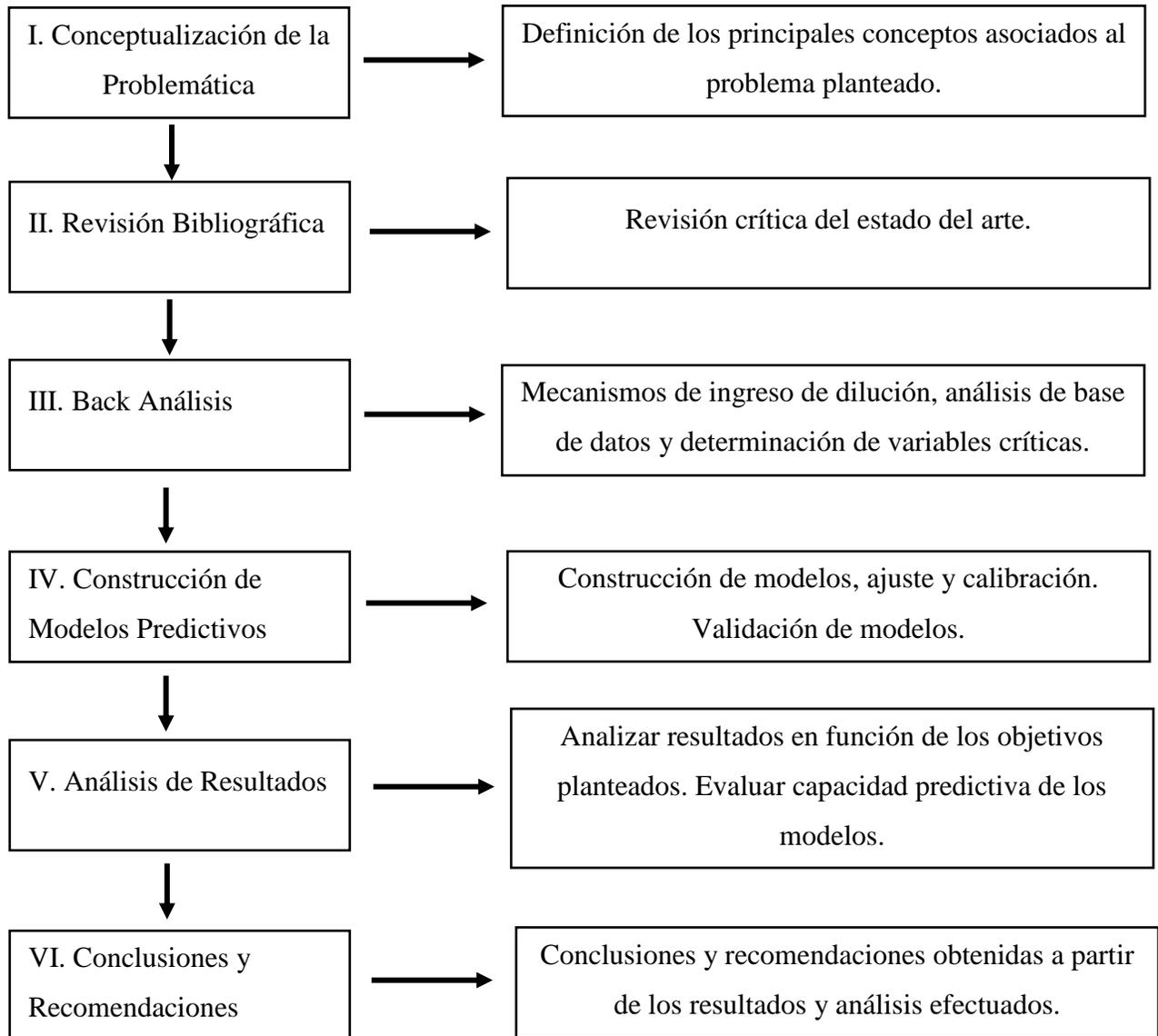


Figura 1. Metodología general de trabajo de memoria.

1.6. Contenidos del trabajo de memoria

A continuación, se exponen los capítulos que estructuran el presente trabajo de memoria con una descripción de sus respectivos contenidos:

Capítulo 1: Introducción. Se introduce el tema del presente trabajo, dando a conocer los principales objetivos y alcances que persigue y delimita el presente estudio, además de su justificación.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica. Corresponde a la revisión del marco teórico y estado del arte de los antecedentes que introducen la realización del trabajo de memoria. Además, se expone el análisis crítico sobre la revisión relacionada a la problemática en estudio.

Capítulo 3: Metodología del estudio. Formulación de los lineamientos y bases a seguir para la construcción de modelos multivariantes.

Capítulo 4: Back Análisis. Presentación del estudio exploratorio de la base de datos y variables influyentes del fenómeno. Planteamiento de hipótesis ante la construcción de modelos.

Capítulo 5: Construcción de modelos multivariantes. Se expone la construcción de la base de datos empleada para obtener los modelos. Junto a esto, se muestran los resultados obtenidos y análisis efectuados ante la construcción, calibración y validación de los modelos.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones. Corresponde a las conclusiones obtenidas a partir del trabajo llevado a cabo, además de comentarios y recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introducción

A modo introductorio, es necesario destacar que existen fenómenos y características que son de vital importancia para la comprensión de la entrada de dilución y su posterior comportamiento. Es así como para generar un modelo que permita determinar el riesgo de entrada de dilución se requiere sentar una base del estado del arte y garantizar la comprensión de cada una de los componentes, fenómenos y variables asociadas.

El presente capítulo tiene por objetivo desplegar la información disponible respecto al fenómeno de ingreso de dilución y las herramientas con las cuales actualmente se lleva un monitoreo y estimación de ésta. En consecuencia, se detalla la revisión de los aspectos teóricos necesarios de entender para tener una correcta concepción del trabajo en cuestión. A continuación, se presenta una revisión que va desde la teoría del comportamiento de la dilución y trabajos actuales; hasta fundamentos de la regresión logística. Junto a esto, se exponen análisis críticos asociados a los elementos presentados, y se culmina con las conclusiones correspondientes al capítulo.

2.2. Teoría del comportamiento de la dilución

2.2.1. Elementos que influyen en la entrada y comportamiento de la Dilución

La literatura indica que existe un conjunto de elementos que afectan la entrada y contenido total de dilución extraída en una operación de caving, los cuales varían desde aquellos relativos a la geometría, geología y geomecánica, hasta el diseño minero y la planificación. Según estudios realizados por Laubscher (2000), los principales parámetros que afectan la dilución corresponden a los expuestos en la siguiente tabla:

Tabla 1. Parámetros que afectan la dilución según Laubscher (2000).

Elementos que influyen en la entrada y comportamiento de la dilución	
Elemento	Descripción
1. Razón volumen de mineral y área de contacto entre mineral y diluyente.	Mientras mayor sea la razón resultante entre el volumen de mineral y el área de contacto mineral-diluyente, menor será el contenido total de dilución extraída.
2. Disposición y forma del material diluyente.	Al comparar una interfaz irregular e inclinada con una lateral vertical con geometría regular, se tiene que el contenido de dilución será mayor en la mezcla extraída para el primer caso.
3. Diferencias de fragmentación entre mineral y el material diluyente.	En la medida en que la fragmentación del material diluyente sea más fina que la del mineral, se presentará una mayor cantidad de dilución en la mezcla. Además, más temprana será la entrada de dilución en dichos puntos de extracción.
4. Diferencias entre densidad de mineral y diluyente.	Mientras mayor sea la densidad del mineral en comparación a la del material diluyente, se tendrá una menor cantidad de contenido de dilución extraída y viceversa.
5. Interacción de los elipsoides de extracción y dirección del flujo.	Para una interacción mayor de elipsoides de extracción se da una menor, y más tardía, presencia de dilución en los puntos de extracción. Además, mientras mayor sea el espaciamiento entre elipsoides, mayor será a probabilidad de extraer un alto contenido de material diluyente a menos que se lleve a cabo un control de tiraje.
6. Variante de hundimiento utilizada (Block o Panel Caving).	Una extracción desarrollada en Block Caving con pequeños bloques implica una dilución lateral mayor que en una estrategia de Panel Caving con un ángulo de extracción definido.

Junto a los elementos ya expuestos, la literatura señala que un indicador fundamental en el estudio de la dilución corresponde al momento en que ésta ingresa a los puntos de extracción. Bajo esta misma línea, DeWolfe (1981) plantea que es esencial para el control de la entrada de dilución realizar una extracción tal que el espacio vacío que se genera entre la pila de material fragmentado y la zona de fractura sea propicio para la propagación de la fragmentación de material in-situ sin que el volumen permita el escurrimiento de material diluyente previamente quebrado. Dicho fenómeno es conocido como “rilling”, y se describe gráficamente en la Figura 2.

En complemento a lo anterior, Vergara (2016) plantea que la sobre-extracción de puntos en una secuencia de Panel Caving contribuye a la entrada de dilución temprana en puntos vecinos a las zanjas sobre-extraída, no solamente a los que se incorporan de forma posterior como lo plantea De Wolfe (1981), sino que también aquellos puntos ya activos pueden ser afectados por dilución

temprana. El autor plantea que lo anterior guarda relación con el ángulo de flujo que se genera producto de la diferencia de alturas entre columnas, y al aumento de la porosidad en la zona cercana a los puntos de extracción, lo cual permitiría la percolación del material más fino.

Además, Valencia (2013) recomienda que para una operación minera explotada mediante Panel Caving se debe mantener un adecuado control de los tonelajes extraídos por los puntos de explotación, en particular, prestando una mayor atención a los puntos vecinos a puntos de vaciados. Lo anterior bajo la finalidad de ayudar a tener un adecuado tiraje, el cual permita mantener constante la diferencia entre columnas vecinas, logrando así evitar ángulos de panel pronunciados. En consecuencia, se permitiría a que se contribuya a una disminución del área de contacto entre mineral y diluyente.

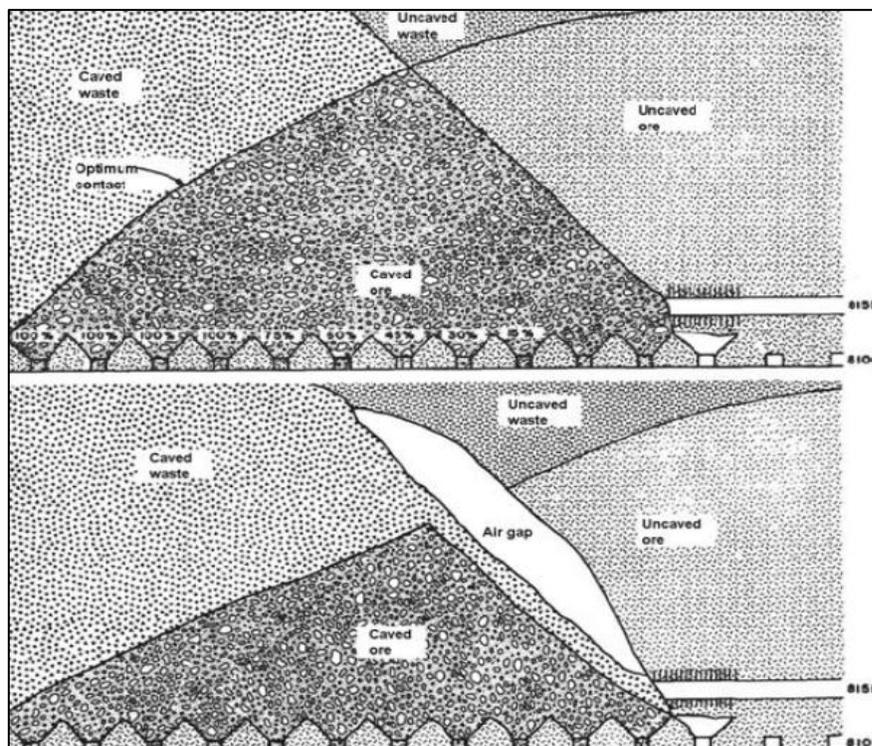


Figura 2. Fenómeno de Rilling. DeWolfe, 1981.

2.2.2. Modelo de comportamiento de dilución de Laubscher

Laubscher (1994), propone una ecuación para determinar el punto de entrada de dilución (PED), la cual está basada en curvas empíricas que contemplan una serie de parámetros y reglas de dedo representado en la ecuación 2.1

$$PED(\%) = \frac{H_c * S - HIZ}{H_c * S} * DFC * 100 \quad (2.1)$$

Con:

- PED (%): Porcentaje de columna extraída donde se registra entrada de dilución.
- Hc: Altura medida desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/diluyente.
- S: Esponjamiento, el cual es dependiente de la fragmentación esperada. Laubscher (1994) propone que los factores de esponjamiento típicos según el tipo de fragmentación esperada de la roca corresponden a 1.16 para fragmentación fina, 1.12 para fragmentación media y 1.08 para fragmentación gruesa.
- HIZ: Altura de interacción de elipsoides de extracción. Laubscher afirma que es en función de la diferencia en la calidad de roca, medida a través de la diferencia entre el RMR del material diluyente y el mineral, contemplando también el espaciamiento de los puntos de extracción a través del ápex mayor (véase Figura 3).

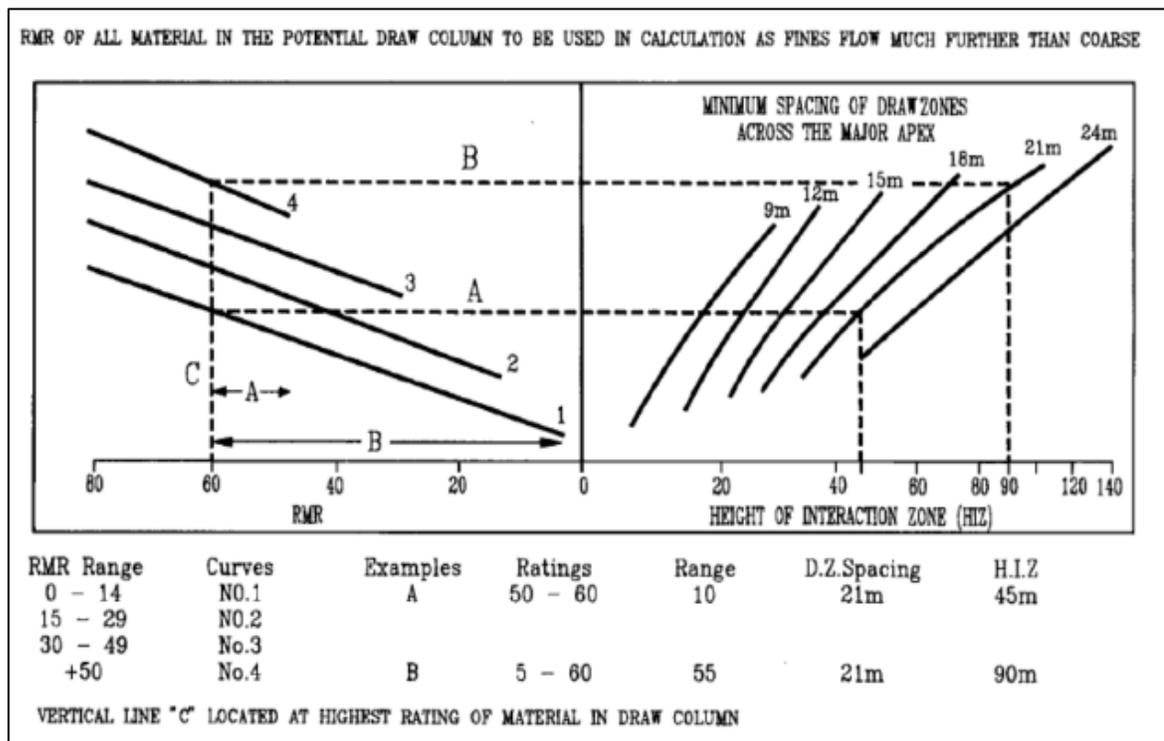


Figura 3. Altura de Interacción. Laubscher, 1994.

- DFC: Diferencias de tonelajes entre un punto y sus vecinos en un determinado período de tiempo, basada en la desviación estándar de los tonelajes extraídos. Laubscher (1994) propone una medida de esta diferencia a través de un índice de control de tiraje (véase Figura 4).

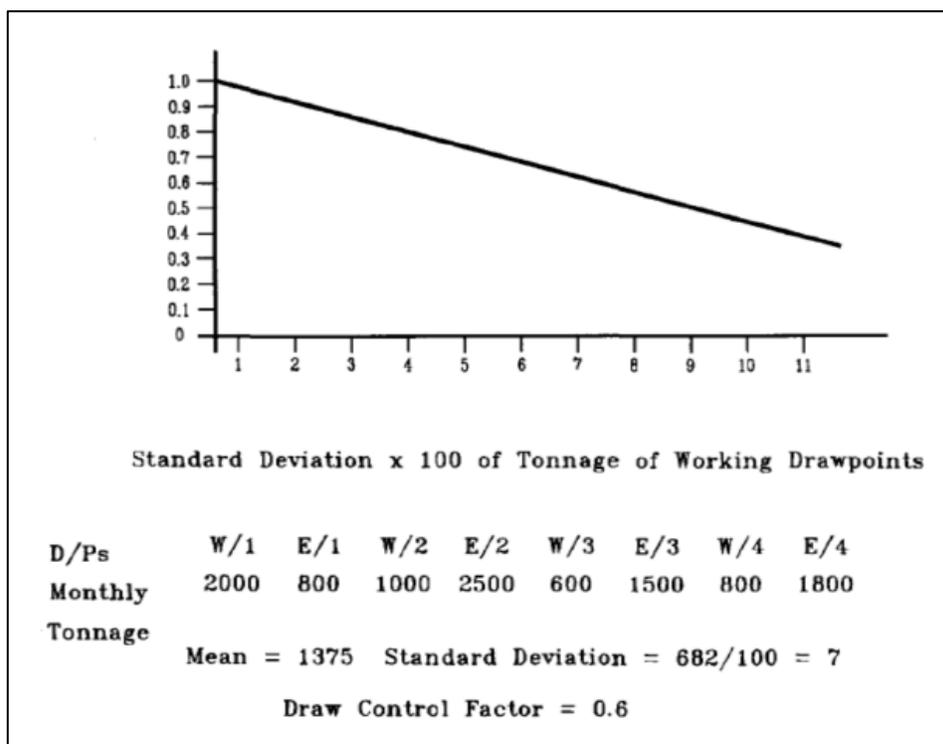


Figura 4. Factor de Control de Tiraje (DFC). Laubscher, 1994.

A partir del modelo propuesto por Laubscher, es importante destacar que tal como señala Paredes (2012), la ecuación es una aproximación determinista para un largo plazo basada en reglas empíricas, y no considera todos los parámetros que él mismo propone, ni otros relevantes. Así, el modelo de Laubscher asume que, bajo ciertas condiciones de calidades de roca, alturas de columna, geometría del nivel de producción y control de tiraje, se tendrá el mismo punto de entrada de la dilución de forma independiente a la dirección de avance de la extracción y la potencial dilución lateral que pudiera afectarlo.

Ya definido el punto de entrada de dilución (PED), Laubscher (1994) plantea un modelo de mezcla volumétrico basado en la división de la columna de extracción en tajadas que poseen un volumen, densidad y leyes iniciales determinadas.

El algoritmo de mezclas de Laubscher consiste en considerar la columna de mineral y dividirla en tramos de 10%, normalizando las coordenadas de la base. Para llevar a cabo el algoritmo, es posible considerar trabajar en áreas unitarias. Luego, se plantea determinar el foco del cual saldrán las rectas que permiten dividir la columna y realizar la mezcla. A partir del foco, se realizan rectas que unen este punto con cada punto medio de bloque según su altura. Posteriormente, se determinan las áreas de cada bloque involucrado para cada tajada a extraer, con las que se obtienen los

ponderadores que van a multiplicar a las leyes del bloque, permitiendo con ello estimar la ley de cada tajada (véase ecuación 2.2).

$$Ley\ Tajada\ i\ [\%] = \sum_j^n Ley\ Bloque_j * a_{ij} \quad (2.2)$$

A continuación, se presenta un esquema a modo de ejemplificación de lo mencionado.

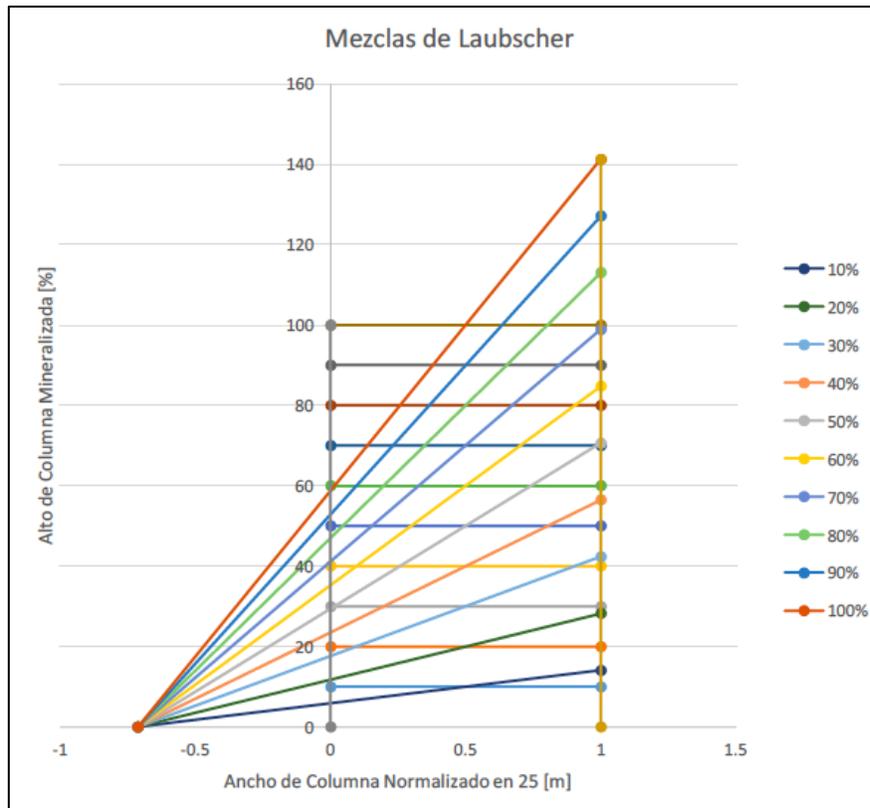


Figura 5. Ejemplo de Modelo de Mezcla de Laubscher.

Cabe destacar que el modelo expuesto considera curvas de mezcla empíricas sin tomar en cuenta el flujo gravitacional. Además, independiente de la estrategia de extracción adoptada y su secuencia de apertura, el PED se mantiene fijo a lo largo del tiempo para los puntos de extracción.

Se han realizado adaptaciones del modelo propuesto por Laubscher para 2 y 3 dimensiones, siendo este modelo volumétrico la base de los algoritmos de mezcla utilizados por la gran mayoría de las operaciones de hundimiento. Sus aplicaciones son enfocadas principalmente para llevar a cabo la planificación y cálculo de reservas.

2.2.3. Modelo de Susaeta

Susaeta (2004), plantea un modelo de flujo gravitacional que caracteriza el comportamiento de la dilución según sea su tipo de flujo. Dentro de los flujos que plantea el autor se encuentran: interactivo, interactivo-aislado y aislado. Susaeta establece que mientras más aislado sea el flujo, más temprana será la entrada de dilución. Además, establece que existe una relación entre uniformidad con que se extrae tonelaje de un punto con respecto a sus vecinos y el tipo de flujo que ocurre en su columna, creando un índice para cuantificarla.

Susaeta (2004) recopila y aborda el problema basándose en los diversos estudios llevados a cabo hasta el momento. A continuación, se presentan los aspectos considerados:

- La extracción aislada de un punto de extracción implica que sobre éste existirá un flujo aislado.
- El diámetro de tiraje aislado (diámetro del elipsoide de extracción en flujo aislado) es función de la fragmentación de la roca y la humedad en la columna de extracción.
- La práctica del tiraje uniforme es necesaria para postergar el punto de entrada de la dilución y minimizar la cantidad total de dilución extraída.
- El diámetro de tiraje aislado es independiente del ancho de carguío.
- El espaciamiento de los puntos de extracción es inversamente proporcional a la recuperación de mineral.
- La altura de columna es inversamente proporcional a la dilución total extraída.
- La fragmentación del material en la columna de extracción aumenta con la extracción.
- Existirá interacción si dos puntos poseen un espaciamiento menor a 1,5 veces el diámetro de tiraje aislado.

En base a lo planteado, el autor señala que el flujo gravitacional, desde la perspectiva de movimiento masivo, puede modelarse en función del comportamiento del flujo masivo, propiedades del material fragmentado y parámetros de caracterización de la extracción y referentes a la geometría de los puntos de extracción.

De los estudios y experimentos de Susaeta (2004), se observa que es posible establecer 2 velocidades de flujo gravitacional. La primera corresponde a la velocidad de tiraje aislado (V_{ta}), y concierne a la presentada por partículas dentro del elipsoide de flujo aislado. La segunda se

denomina velocidad de tiraje interactivo (V_{ti}), y corresponde a la que presentan las partículas que viajan fuera de la zona de baja densidad que forma el elipsoide de flujo aislado.

A partir de lo planteado, Susaeta señala que el comportamiento del flujo puede ser clasificado en 3 condiciones, las cuales están en función de la diferencia entre velocidades de tiraje interactivo y aislado.

- a. **Tiraje Aislado:** Condición de flujo donde V_{ta} es mayor que cero y V_{ti} es igual a cero.
- b. **Tiraje Aislado-Interactivo:** Condición de flujo donde V_{ta} es mayor que V_{ti} , y ambas son mayores que cero.
- c. **Tiraje Interactivo:** Condición de flujo donde V_{ta} es igual a V_{ti} , y ambas son mayores que cero.

Dado el modelo, el autor plantea que en la medida en que el comportamiento del flujo sea más Interactivo, la dilución observada en el punto de extracción será menor. Además, postula que cuando el flujo se comporte como tiraje Aislado-Interactivo y tiraje Interactivo, la dilución que se observe al principio de la extracción del punto corresponderá a dilución lateral, y luego comenzará el ingreso del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción (vertical). Junto a lo anterior, para el caso de tiraje Aislado, la primera observación de dilución en el punto corresponderá al ingreso del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción (vertical), y el contenido de dilución observado será creciente en la medida en que se siga realizando la extracción de forma más agresiva que para los otros casos. A continuación, se presenta la Figura 6 que permite observar los comportamientos de flujos en un punto de extracción, según lo planteado por Susaeta. Conforme a lo anterior, el autor define el “índice de uniformidad” y posteriormente el “porcentaje de uniformidad” a fin de caracterizar la forma en que se realiza la extracción sobre un punto con respecto a sus vecinos.

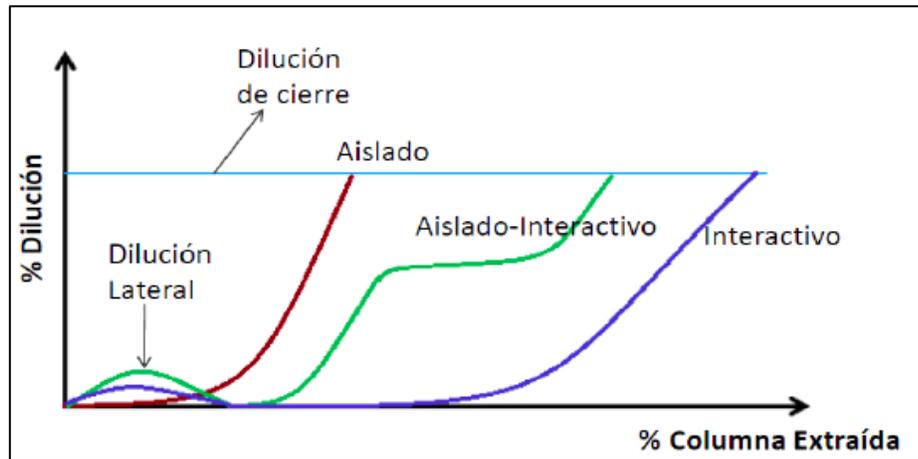


Figura 6. Comportamientos de dilución según modelo de flujo, adaptado de Susaeta (2004). Paredes, 2012.

El índice de uniformidad se define como un vector de 2 dimensiones de la siguiente manera en la ecuación 2.3:

$$I. U = \Delta + \tau * \frac{(T_p - T_{min})}{T_{max}^2 * n} * \sum_{i=1}^n (T_{max} - T_i) \quad (2.3)$$

Donde:

- Δ : Número de vecinos inactivos.
- τ : Factor de normalización.
- T_p : Tonelaje extraído del punto en un período determinado.
- T_{min} : Tonelaje mínimo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- T_{max} : Tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- T_i : Tonelaje extraído en un período de tiempo determinado para el punto i , el cual es perteneciente a la vecindad del punto en cuestión.
- n : Número de puntos pertenecientes a la vecindad en cuestión.

La primera dimensión del índice (Δ) corresponde al número de vecinos inactivos del punto, mientras que la segunda dimensión se denomina “índice de uniformidad específico”.

Susaeta (2004) utiliza la siguiente matriz bajo la finalidad de determinar en qué estado o condición de tiraje se encuentra un punto a partir de cierto índice de uniformidad y número de puntos inactivos en la vecindad geométrica.

Tabla 2. Matriz de Uniformidad, adaptada de Susaeta (2004).

	Índice Específico de Uniformidad					
		0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1
Número de Vecinos Inactivos en la Vecindad	0	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Semi	Semi
	1	Uniforme	Uniforme	Semi	Semi	Semi
	2	Uniforme	Semi	Semi	Semi	Aislado
	3	Semi	Semi	Semi	Aislado	Aislado
	4	Semi	Semi	Aislado	Aislado	Aislado
	5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

Junto a lo anterior, Susaeta (2004), introduce el concepto de “porcentaje de uniformidad”, el cual lo define como el porcentaje de tiempo (o de toneladas extraídas) durante el cual un punto se encuentra extrayendo en una condición uniforme, semi-uniforme o aislado.

A fin de comprobar que es posible la transición de un tipo de comportamiento de flujo a otro a través de los parámetros que controlan la extracción, Susaeta (2004) realiza estudios del grado de interacción en El Teniente y del cálculo del punto de entrada de dilución para sectores del El Salvador y El Teniente. Además, estudia el comportamiento de la dilución del sector Parrillas de Andina.

Sus estudios indican que mientras menor es la uniformidad, menor es el grado de interacción (más aislado es el flujo). Además, el punto de entrada de dilución para distintos sectores de El Salvador y El Teniente tiene una dependencia directa con el I.U para aquellos puntos que poseen un porcentaje de uniformidad superior al 70%.

En complemento a lo anterior, Susaeta (2004) encuentra una relación entre el Pedza (punto de entrada de la dilución en flujo aislado) y el índice de uniformidad, confirmando la hipótesis del retraso del punto de entrada de la dilución con el aumento del porcentaje de uniformidad. En la Figura 7 se muestra la relación entre el Pedza y el I.U. para el sector Parrillas en Andina.

En el 2008, el autor publica un trabajo de estudio de comportamiento de la dilución en minas de Codelco, basado en el modelo creado el 2004. En el estudio, la principal conclusión es que la forma en que se realiza la extracción (uniformidad de tonelajes) posee un impacto determinante en el

punto de entrada de dilución. Por lo tanto, a través del control de la uniformidad es posible retrasar el punto de entrada de dilución para un panel en explotación.

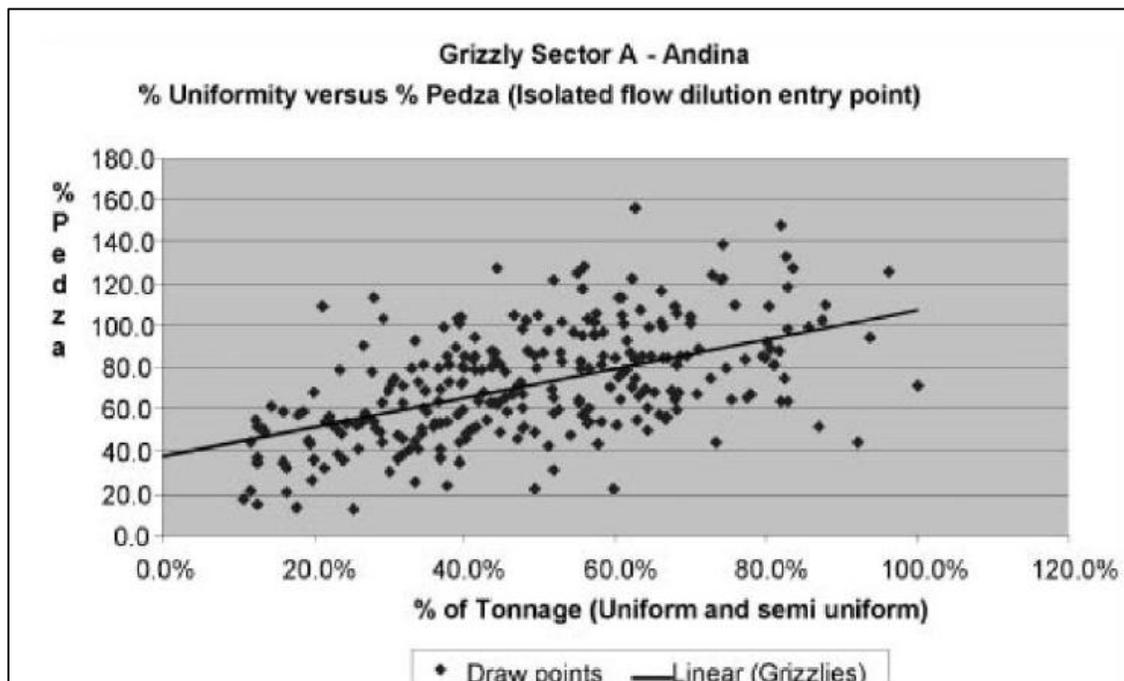


Figura 7. Relación entre el I.U y el Pedza para el sector de Parrillas de Andina. Susaeta, 2004.

2.2.4. Mecanismos de entrada de dilución

Paredes (2012, 2014) realizó trabajos para establecer mecanismos de entrada de dilución en la minería de caving. Para lo anterior, utilizó datos provenientes de El Salvador y Andina.

A partir de su trabajo, el autor propone 3 mecanismos de ingreso de dilución para una operación de hundimiento, los cuales se detallan a continuación:

- a. **Entrada de dilución debido a desplazamiento vertical:** La dilución ingresa a los puntos de extracción descendiendo de manera vertical. Ocurre cuando la fuente de dilución está ubicada encima del panel a explotar y existe una propagación regular del cave back hacia ella (véase Figura 8).
- a. **Entrada de dilución debido a desplazamiento horizontal:** Cuando el panel está ubicado a un costado del sector a previamente explotado se tiene que en medida que la secuencia avanza, el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. En caso de generarse un espacio de aire lo suficientemente grande para permitir la entrada de material quebrado y el ángulo de la pila de material granular es tal que permite el flujo lateral del

material, se tiene que éste viajará hasta los puntos de extracción más alejados de la interfaz con el material quebrado, produciéndose así un desplazamiento horizontal (véase Figura 9).

- b. Entrada de dilución posterior a un evento de colgadura de cave back:** Este mecanismo de entrada de dilución fue observado particularmente para sectores de El Salvador. Este mecanismo es consecuencia en caso de que ocurra colgadura del cave back y se continúe la extracción del área abierta sin incorporar área nueva, teniéndose que el vacío generado por la extracción no sea llenado por material fragmentado y por ende exista acumulación de un bolsón de aire. Una vez se incorpore área nueva a la extracción, el cave back se propagará de manera espontánea y la dilución ubicada encima del panel de explotación ingresara a los puntos de extracción luego de un estallido de aire (véase Figura 10).

Paredes (2012), plantea que un factor determinante en los mecanismos propuestos anteriormente corresponde a la propagación del cave back debido a la ubicación de la dilución (condición de borde) y a la estrategia adoptada en esta área (condición operacional). A continuación, se presentan perfiles esquemáticos de las secuencias de los mecanismos descritos anteriormente.

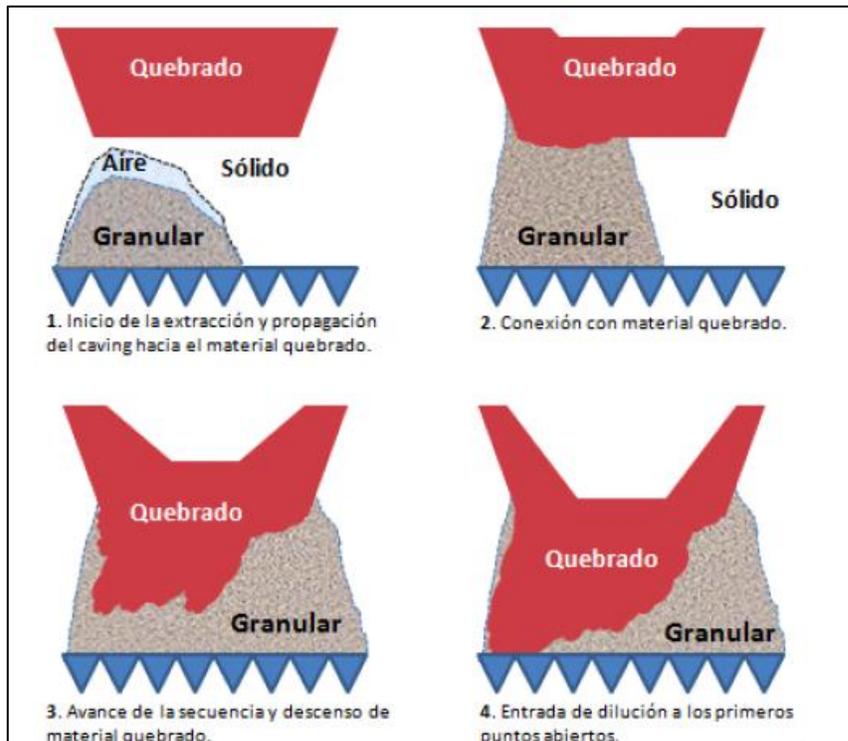


Figura 8. Perfiles de secuencia de mecanismos de ingreso de dilución vertical. Paredes, 2012.

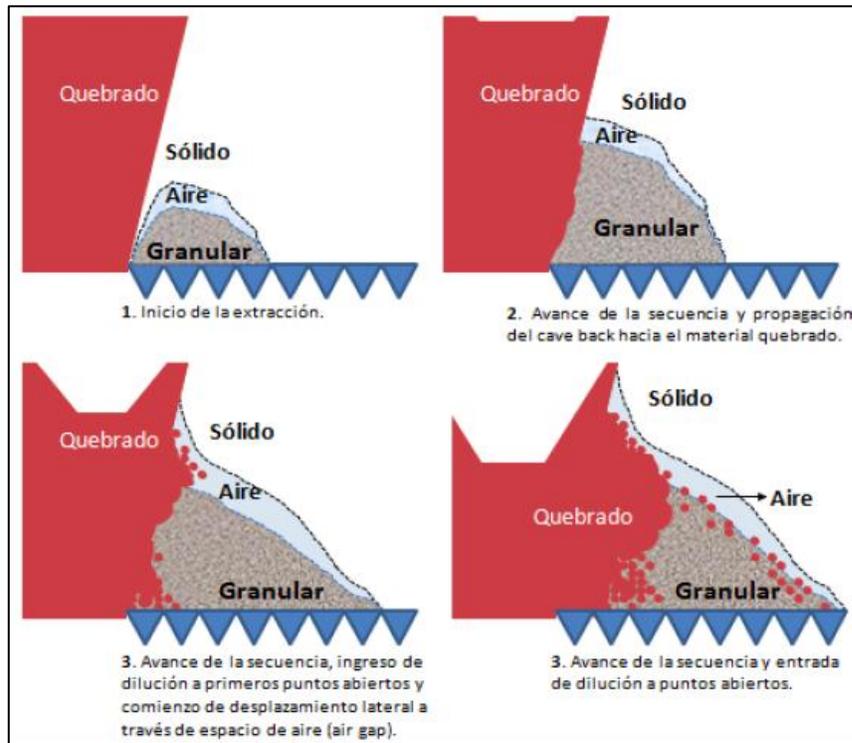


Figura 9. Perfiles de secuencia de mecanismos de ingreso de dilución lateral. Paredes, 2012.

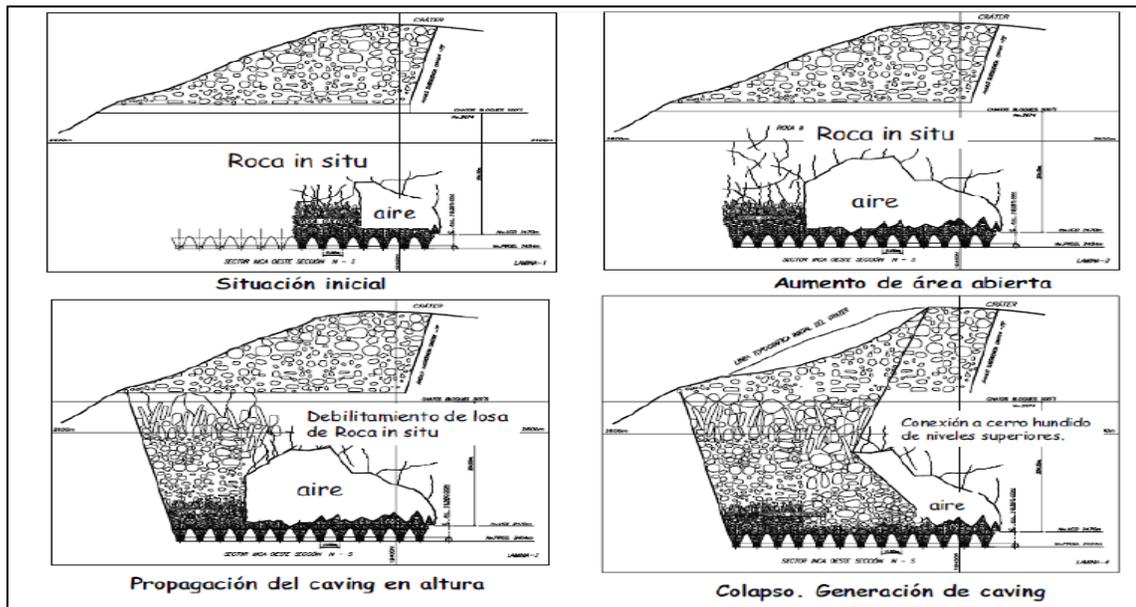


Figura 10. Secuencia de eventos de colapso y air blast al comienzo de la secuencia. De Nicola y Fishwick, 2000.

Junto a lo anterior, a partir de lo realizado, Paredes observó que la entrada de dilución tiene un comportamiento de pulso, es decir, entra en ciertos períodos y luego desaparece, hasta que llega un momento en el cual entra de forma definitiva. En consecuencia, Paredes define el punto de entrada

de dilución como el porcentaje de la columna in situ extraída donde ingresa dilución acumulada al 3%, es decir, PED(3%). Lo anterior, dado que representa un volumen robusto de datos. La evaluación consistió en criterios de 3%, 5% y 10%, eliminando aquellas curvas sin entrada de dilución significativa. Los criterios del 5% y 10% generaron una pérdida de información significativa, por lo cual fueron descartados por el autor.

En Andina se distinguen dos elementos diluyentes, correspondientes a Quebrado y Riolita. Además, dada la alta variabilidad del PED observada, el autor recomienda llevar a cabo una estimación punto a punto de la entrada de dilución.

A modo de resumen, se tienen los siguientes mecanismos de entrada de dilución propuestos para los diferentes sectores de Andina que analizó el autor dada la malla empleada.

Tabla 3. Sectores de Andina y Mecanismos de entrada de entrada de dilución.

Sector de Andina	Mecanismo de entrada de dilución
Parrillas Norte	Dilución Vertical (riolita) y lateral (quebrado)
Parrillas Sur	Dilución lateral (riolita y quebrado)
LHD Norte	Dilución vertical (riolita)
LHD Sur	Dilución vertical (riolita y quebrado)

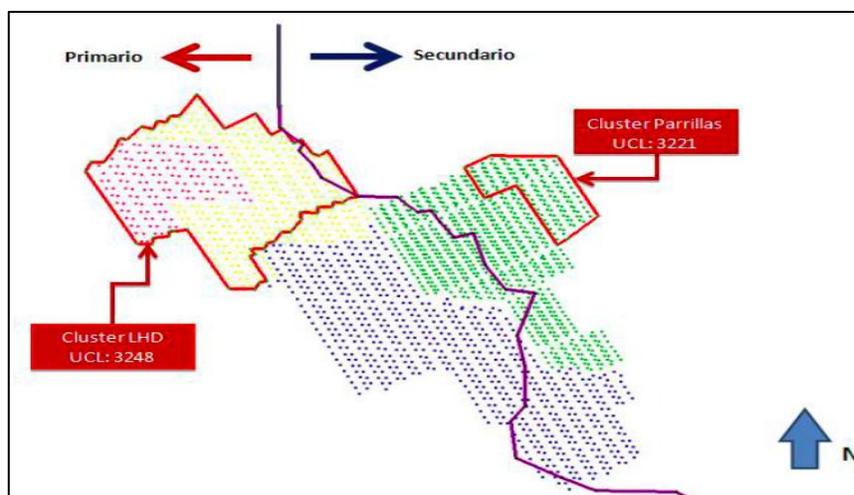


Figura 11. Vista en planta de la ubicación espacial de los clusters de dilución. Paredes, 2012.

2.3. Herramientas de simulación como método de predicción

2.3.1. Herramientas actualmente empleadas

En la actualidad, existen una serie de softwares que permiten determinar la dilución en la minería de caving. Dichos softwares, en general, determinan la dilución para el largo plazo, generándose así incertidumbre a escala operacional. Algunos de éstos corresponden a los siguientes:

- a. **PCBC:** Utiliza reglas de mezclas geométricas para determinar la mezcla de materiales en la columna de mineral quebrado que se produce en una mina de caving. Su input corresponde al PED, y el porcentaje de dilución en el plan es un output.
- b. **Rebop:** Es un modelo numérico de flujo gravitacional basado en observaciones en PFC3D y experimentos de laboratorio. El PED y el porcentaje de dilución en el plan son outputs.
- c. **FlowSim:** Se basa en uso de autómatas celulares en el modelamiento de flujo. Destaca la implementación del modelo numérico en computadores de uso común, obteniendo tiempos de simulación considerablemente menores a los simuladores dinámicos. Tanto el PED como el porcentaje de dilución son outputs.

2.3.2. Métricas de clasificación por matrices de contingencia

El análisis de modelos mediante el uso de matrices de contingencia permite la obtención de indicadores de desempeño del estimador para así evaluar su calidad. El cálculo de indicadores se basa en el porcentaje de casos correctamente clasificados según el estimador mediante el contraste de los casos observados e hipotéticos. A partir de lo anterior, se define las variables verdaderos positivos (VP), verdaderos negativos (VN), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) de acuerdo al acierto entre la estimación y el dato real. En consecuencia, la matriz de contingencia se construye acorde a la cantidad de aciertos y desaciertos tal como se expone a continuación:

Matriz de Contingencia		Casos Reales	
		Positivo	Negativo
Casos Hipotéticos	Positivo	VP	FP
	Negativo	FN	VN

Figura 12. Matriz de Contingencia.

Conforme a las variables VP, VN, FN y FP, es posible generar un conjunto de métricas para caracterizar el desempeño del estimador, las cuales corresponden a la tasa de verdaderos positivos (ecuación 2.4), tasa de falsos positivos (ecuación 2.5) y exactitud (ecuación 2.6), presentadas a continuación:

$$VPt = \frac{VP}{VP+FN} \quad (2.4)$$

$$FPt = \frac{FP}{FP+VN} \quad (2.5)$$

$$Exactitud = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN} \quad (2.6)$$

Las métricas VPt y FPt corresponden a los cocientes entre los eventos positivos que son correctamente estimados y eventos erróneamente estimados de forma respectiva. Por su parte, la Exactitud permite tener una noción del porcentaje de aciertos del estimador en relación a la totalidad de los eventos predichos. Un estimador perfecto presenta métricas VPt y Exactitud iguales a 1, mientras que FPt igual a 0.

Conforme a lo anterior, la exactitud puede también explicarse en función de la sensibilidad y especificidad. La sensibilidad de una prueba diagnóstica es la probabilidad de obtener un resultado positivo cuando el estado observado es positivo. Por su parte, la especificidad de una prueba indica la probabilidad de obtener un resultado negativo cuando el estado es realmente negativo.

Bajo el mismo enfoque anterior, es posible establecer un índice de confiabilidad, el cual puede ser empleado bajo el objetivo de cuantificar la precisión de simulaciones. Particularmente para este trabajo de memoria, es posible definir la confiabilidad como la capacidad que tiene una simulación, llevada a cabo a partir de un modelo, de reproducir la entrada (o no entrada) del marcador geológico de dilución determinado a nivel de puntos de extracción (véase ecuación 2.7).

$$Confiabilidad [\%] = \frac{(S+N)}{2} * 100 \quad (2.7)$$

Donde:

- S: Cociente entre el número de puntos con entrada de dilución declarada tanto para el dato mina como en la simulación (FP) y el número de puntos con entrada de marcador geológico en el dato mina.

- N: Cociente entre el número de puntos sin entrada de dilución declarada tanto para el dato mina como en la simulación (VN) y el número de puntos sin entrada de marcador geológico en el dato mina.

2.3.3. Estudios con herramientas actuales

Diferentes autores han trabajado y establecido diferencias entre las herramientas empleadas actualmente a partir de evaluaciones a escala industrial. Paredes (2012), realizó simulaciones en Rebop para los sectores de Andina y el Salvador. A partir de las simulaciones llevadas a cabo estableció que Rebop simula bien aquellos sectores que tienen una entrada vertical de dilución. Sin embargo, lo anterior no ocurre para sectores con una entrada lateral de dilución ni para la entrada producto de una colgadura de cave back.

Junto a lo anterior, el autor señala que la diferencia de períodos de entrada de dilución entre la simulación y el dato real varía entre 1 a 6 meses, por ende, concluye que Rebop es una herramienta buena para predecir el ingreso de dilución en el largo plazo en la mayoría de los sectores analizados. Conforme a lo planteado, a continuación se muestra la Tabla 4 con el resumen del mejor set de simulaciones del autor, en la cual se expone la confiabilidad obtenida, error cuadrático medio y la media tanto para el punto de entrada de quebrado acumulado al 3%, PEQ(3%); como la de riolita acumulada al 3%, PER(3%).

Tabla 4. Simulaciones Paredes (2012).

Set 3 Fragmentación Fina		PER(3%)			PEQ(3%)		
		Confiabilidad (%)	RMSE (%)	Media	Confiabilidad (%)	RMSE (%)	Media
Cluster LHD	Área Norte	50	30	54±17	82	14	50±12
	Área Sur	44	0	65±16	72	37	58±24
Cluster Parrillas	Área Norte	55	26	49±32	55	18	21±14
	Área Sur	45	6	15±13	61	13	21±18

Bajo esta misma línea, Valencia (2013) realizó simulaciones en FlowSim 2.0 para sectores del Salvador, donde los resultados respecto al ingreso de dilución arrojaron que los mayores errores estaban asociados a los falsos positivos (falsas alarmas), es decir, puntos en que la simulación indica presencia de dilución, pero en el dato real no corresponde. Valencia concluye que la presente herramienta tiene una tendencia a sobreestimar la dilución puesto que existe una preferencia por su parte a incorporar el área adyacente de la zona de dilución.

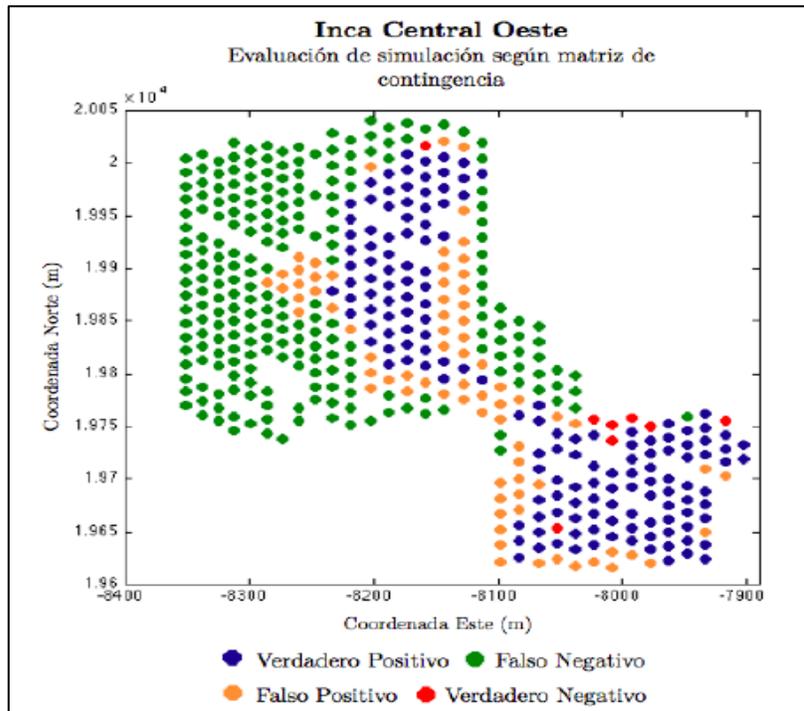


Figura 13. Inca Central Oeste: Resultados Matriz de contingencia según punto de extracción. Valencia, 2013.

Junto a lo anterior, Valencia (2013) comparó FlowSim con Rebop, donde quedó establecido que los tiempos de simulación asociados a FlowSim son menores a los requeridos por Rebop. Junto a esto, la calidad respuesta de FlowSim es mejor que su caso análogo en Rebop (granular).

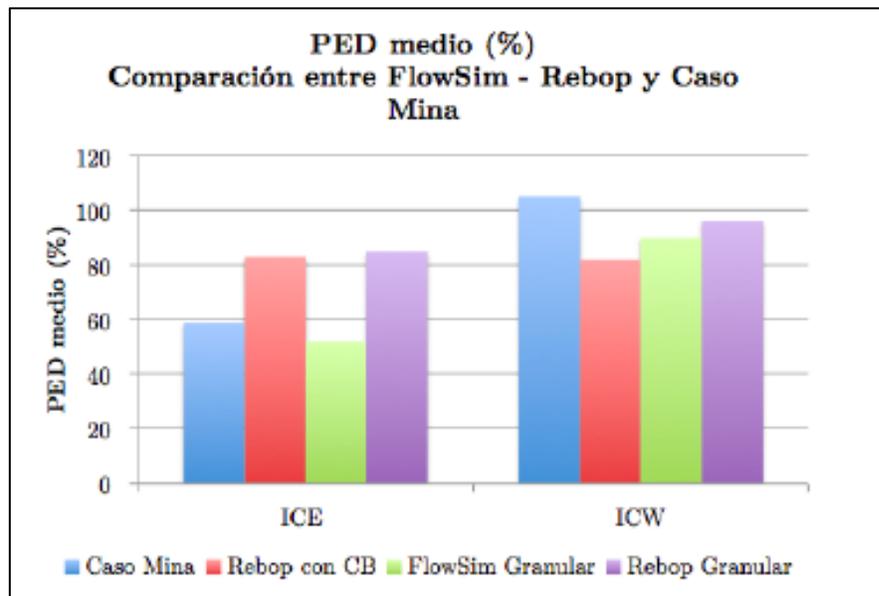


Figura 14. Comparación PED medio entre FlowSim, Rebop y datos mina. Valencia, 2013.

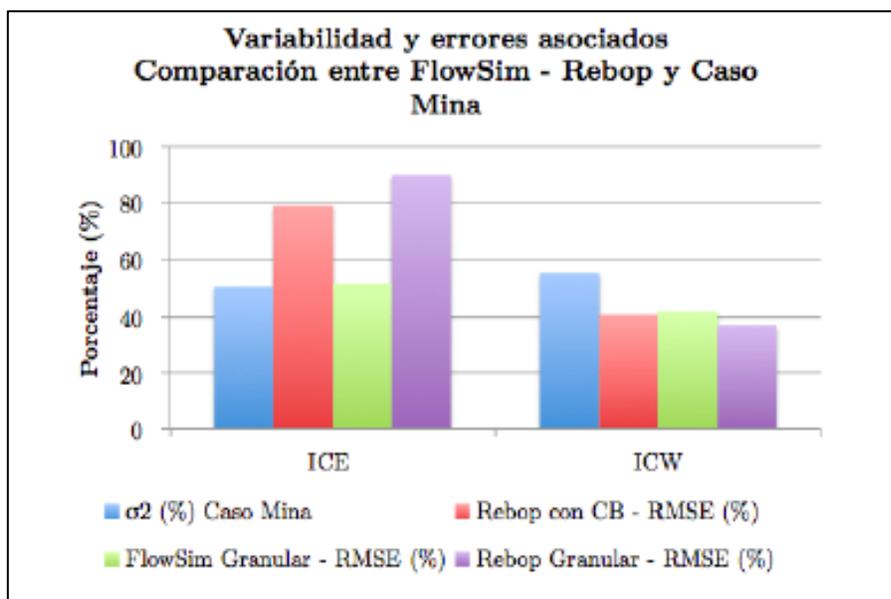


Figura 15. Comparación de Desviación Estándar del PED con error cuadrático medio entre FlowSim, Rebop y datos mina. Valencia, 2013.

Finalmente, Armijo (2013) lleva a cabo dos simulaciones en Rebop para el sector LHD del Panel III de Andina, a partir de las cuales el autor indica que el simulador presenta bajas exactitudes para determinar el punto de entrada de dilución acumulada al 3% de material quebrado, PEQ(3%). Junto a lo anterior, el autor observa que para los puntos analizados se presenta una baja correlación del valor simulado con el dato mina, sumado a una subestimación del número total de puntos con dilución, además de una sobrestimación del tiempo y tonelajes promedios a los cuales ocurre el evento. En la Tabla 5 se resumen las dos simulaciones llevadas a cabo por el autor.

Tabla 5. Simulaciones Armijo (2013).

Parámetros	Simulación 1	Simulación 2	Dato Mina
Puntos con evento	95	82	107
PEQ(3%) promedio [kton]	89.7	114.0	75.0
Desv. Estándar PEQ(3%) [kton]	17.0	16.5	43.3
Entrada promedio del PEQ(3%) [meses]	44	50	36

A partir de los antecedentes anteriormente expuestos, es posible desarrollar un análisis crítico a los métodos y herramientas actualmente utilizados para determinar la dilución en la minería de caving (véase Tabla 6).

Tabla 6. Análisis crítico de métodos empleados para estimar la dilución.

Método	Análisis Crítico
Modelo de Laubscher	Aproximación determinista para un largo plazo basada en reglas empíricas, la cual no considera todos los parámetros que el mismo autor propone, ni otros relevantes. Para ciertas condiciones de calidades de roca, alturas de columna, geometría del nivel de producción y control de tiraje, se tendrá el mismo punto de entrada de la dilución constantemente de forma independiente a la dirección de avance de la extracción, estrategia adoptada, secuencia de apertura y potencial dilución lateral que pudiera afectar. Además, no se toma en cuenta el flujo gravitacional.
PCBC	Determina la dilución para un enfoque de largo plazo, generándose así incertidumbre en el corto plazo o a escala operacional. El PED es un input y el porcentaje de dilución en el plan es un output. El software presenta complejidades y tiempos de estimación altos, mientras que confiabilidades bajas.
Rebop	El PED y porcentaje de dilución en el plan son outputs. Rebop simula bien aquellos sectores que tienen una entrada vertical de dilución, pero no así aquellos con una entrada lateral ni producto de una colgadura de cave back. Además, su enfoque es hacia un largo plazo. Presenta tiempos de simulación altos.
FlowSim	El PED y el porcentaje de dilución son outputs. Menores tiempos de simulación que Rebop. Tiene una predisposición a sobreestimar la dilución puesto que existe una tendencia por su parte a incorporar el área adyacente de la zona de dilución. Presenta un enfoque hacia el largo plazo.

A partir de lo expuesto, la evidencia demuestra que un conjunto de elementos es relevante al momento de analizar el ingreso de dilución en los puntos de extracción. Así, los modelos con enfoque a la representación de este fenómeno debiesen incluir estas variables que denotan características de entorno y operacionales. En complemento, se desprende que en la actualidad existe un conjunto de herramientas que permiten determinar el fenómeno, no obstante, éstas tienen un enfoque hacia el largo plazo, bajas confiabilidades y una complejidad elevada.

Dada la naturaleza, características de las variables y problemas observados ante la utilización de las herramientas actuales en la estimación de la dilución, se propone emplear una herramienta estadística para tener un acercamiento al riesgo de ocurrencia del fenómeno. Lo anterior permite un acercamiento más directo a una operación minera, puesto que propone determinar la probabilidad de ingreso de dilución en función de variables operacionales y de entorno; presentando una ventaja radicada en que estos datos ya son monitoreados en la operación minera.

2.4. Regresión Logística

La premisa anterior indica que en la actualidad existen reglas empíricas y softwares que permiten determinar la entrada de dilución. Sin embargo, los modelos de dilución actualmente no presentan la confiabilidad deseada. No obstante, son ampliamente empleados para planificar e incluso evaluar proyectos, dando así un alta cabida a errores asociados a la rentabilidad que podría tener un negocio minero.

En el presente existen numerosas herramientas que permiten calcular la probabilidad de ocurrencia de un evento en función de varias variables. Sin embargo, estas herramientas presentan requerimientos específicos respecto a la naturaleza de la información utilizada, número mínimo de datos y distribuciones de estos (Valencia 2016). Así, un modo de abarcar el fenómeno de entrada de dilución, además de reglas empíricas y simulación, es por medio del cálculo del riesgo de ingreso de ésta mediante el uso de regresión logística.

Consecuentemente, se propone modelar los datos con la técnica de regresión logística, metodología ya utilizada en la determinación del riesgo de agua barro, cuya ecuación permite incorporar elementos de planificación minera, admitiendo calcular el riesgo de ingreso de dilución a los puntos de extracción. Conforme a lo anterior, la herramienta presenta flexibilidad ante la incorporación de variables a un modelo, y la posibilidad quitar complejidad al problema al dar un análisis desde el punto de vista estadístico, sin requerir de un planteamiento de conocimientos aún no resueltos completamente en diferentes ámbitos.

La regresión logística presenta el mismo objetivo que otras regresiones utilizadas comúnmente en la estadística, el cual es buscar el mejor ajuste, que sea parsimonioso¹ e interpretable. El uso de distribuciones logísticas generalmente trae resultados buenos. Además, desde el punto de vista matemático, es flexible en términos de requerimientos de distribuciones de datos y la naturaleza de las variables independientes o predictoras (continúas, discretas, binarias, etcétera). Además, esta herramienta es simple de usar, entregando siempre resultados positivos. Junto a lo anterior, la regresión logística da una buena base para llevar a cabo análisis o comprender el significado del efecto de lo estimado.

¹ El principio de parsimonia es un principio metodológico y filosófico, el cual alude a que, en igualdad de condiciones, la solución o explicación más sencilla suele ser la mejor o más probable.

La regresión logística considera la relación entre una variable dependiente dicotómica (Y), y un set de datos llamados variables independientes (x_1, x_2, \dots, x_n) que permiten describirla. Esta regresión posee diferencias con respecto a otras regresiones como la lineal. Así, primero cabe destacar que su variable de salida es dicótoma o binaria, donde lo anterior se refleja en la forma del modelo. Generalmente, una variable binaria es presentada por 0 y 1, donde 0 podría ser la ausencia de algo, y 1 la presencia.

Una segunda diferencia importante entre la regresión logística y la lineal corresponde a la distribución condicional de la variable de salida.

Finalmente, cabe destacar que la regresión logística permite trabajar con eventos raros, los cuales son asociados a aquellos eventos que tienen una ocurrencia menor al 5% de los datos estudiados. King and Zeng (2001) plantean una corrección que permite mantener el comportamiento de la variable dependiente. Dicha corrección contempla reducir la base de datos inicial por medio del uso de una selección aleatoria o aleatoria estratificada tomando en cuenta todos los eventos positivos (Y=1) de la base de datos y se estableciendo que esta porción de datos debe ser entre un 25% y un 30% de la base de datos total. En consecuencia, la base de datos restante de negativos (Y=0) debe ser seleccionada aleatoriamente.

2.4.1. Fundamentos de las Regresiones Logísticas

La regresión logística puede ser descrita por la expresión $E\{Y|x\}$, donde dicha expresión se interpreta como el valor esperado de Y dado un valor de x. Cuando se usa una distribución logística se tienen las siguientes relaciones (véase ecuaciones 2.4 y 2.5):

$$\pi(x) = E\{Y|x\} \quad (2.4)$$

$$\pi(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}} \quad (2.5)$$

Para β_0 constante y β_i coeficientes de las variables independientes x_i , con $i= 1, 2, \dots, n$.

Bajo la finalidad de trabajar de forma más sencilla con la función anterior, se establece la transformada logit de esta regresión logística, la cual al ser desarrollada arroja una relación lineal posible de apreciar en la ecuación 2.9.

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)} \right] \quad (2.8)$$

$$g(x) = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \dots + \beta_n * x_n \quad (2.9)$$

La transformada posee una serie de propiedades deseables de un modelo lineal de regresión, las cuales corresponden a su posibilidad de ser continua, lineal, y el amplio rango dependiente del rango de la variable independiente x ($-\infty, +\infty$).

A modo de resumen, es importante destacar lo siguiente (según D. Hosmer et al., 2013):

- El modelo para la media condicional de la ecuación de regresión debe ser delimitado en 0 y 1. El modelo de regresión logística planteado en las ecuaciones anteriores lo satisface.
- La distribución binomial describe la distribución de los errores, y es la distribución estadística en la cual se basa el análisis.
- Los principios que guían un análisis usando regresión lineal también llevan a guiar a la regresión logística.

2.4.2. Ajuste de Regresión Logística

Ajustar $\pi(x)$ a un conjunto de datos requiere estimar los valores de β_0 y β_i (parámetros desconocidos), con $i=1, \dots, n$. En regresión lineal usualmente se utiliza mínimos cuadrados para estimar estos parámetros. Sin embargo, esto no aplica bien para variables binarias. Así, para estimar los parámetros desconocidos en una regresión logística, se utiliza preferentemente el método de máxima verosimilitud. Este método permite conseguir valores para los parámetros desconocidos, tales que maximizan la probabilidad de obtener los valores observados de la base de datos. Para aquello, es necesario llevar a cabo la construcción de una función de verosimilitud.

La función de verosimilitud expresa la probabilidad de los datos observados en función de los parámetros desconocidos. Los estimadores de máxima verosimilitud son los valores que maximizan esta función, es decir, aumentan la probabilidad de obtener un valor observado.

Para obtener los coeficientes antes mencionados se puede emplear el uso de diversas herramientas, entre las que destaca el software estadístico SPSS, el cual utiliza los algoritmos planteados con anterioridad.

Junto a lo anterior, se busca que el modelo de regresión logística sea lo más parsimonioso posible, es decir, que presente el menor número de variables manteniendo su consistencia. Es así como cada una de las variables a ingresar al modelo deben ir siendo testeadas a fin de buscar si las variables tienen una significancia considerable en el modelo.

El testeo de cada una de las variables independientes puede llevarse a cabo mediante el uso de un análisis univariable con la variable dependiente, esto complementado con la ayuda del test de Chi-Cuadrado para evaluar la significancia estadística. Respecto a lo anterior, cabe destacar que también es posible utilizar el test de Wald, el cual es empleado por defecto por el software SPSS.

2.4.3. Odds Ratio

La regresión logística permite una interpretación de sus resultados sencilla pues los coeficientes resultantes cuantifican la importancia entre la variable independiente y la variable dependiente.

Para una variable dicotómica, las probabilidades de pertenencia al grupo objetivo son igual a la probabilidad de pertenencia al grupo objetivo dividido por la probabilidad de pertenencia en el otro grupo. El valor de las Odds puede tomar un rango que va desde 0 a ∞ , e indicar cuánto más probable es que una observación sea miembro de un cierto grupo antes que otro. A modo de ejemplo, si la probabilidad es de 0.8, las Odds serían de 4 a 1 o 80/20.

Otro concepto importante que está asociado a lo anterior, corresponde a los Odds Ratio (OR). Éstos estiman el cambio en las probabilidades de pertenencia al grupo objetivo ante un aumento de una unidad en el predictor (variable independiente). Las OR se calculan mediante el uso de la exponencial de los coeficientes de regresión de las variables independientes (véase ecuación 2.10). A modo de ejemplo, suponiendo un coeficiente igual 2, la OR correspondería a e^2 y, por lo tanto, las probabilidades de pertenecer a un grupo son e^2 veces mayores ante la variación en una unidad de su variable independiente asociada al coeficiente.

$$OR = \exp(\beta_i(x_1 - x_2)) \quad (2.10)$$

2.4.4. Análisis ROC

La sensibilidad y especificidad de los modelos denotan cuán bueno es el desempeño del estimador, dependiendo del punto de corte empleado para determinar la ocurrencia del evento. No obstante, según Hosmer (2013), una forma más completa y mejor descrita para determinar la exactitud del modelo corresponde al área característica bajo la curva (ROC). La curva ROC traza la probabilidad de detectar la ocurrencia verdadera (sensibilidad) y aquella falsa (1-especificidad) para una gama de puntos de corte. Ésta se ha convertido en un estándar para evaluar la capacidad del modelo ajustado para asignar más altas probabilidad a la ocurrencia del evento ($Y=1$) que a su no ocurrencia ($Y=0$).

El área bajo la curva ROC, cuyo rango va desde 0.5 a 1.0, arroja una medida de la habilidad del modelo para discriminar entre aquellos sujetos que experimentan el resultado de interés. Así, en

general, para discernir entre qué área describe una buena discriminación se usa la regla de dedo expuesta a continuación (Hosmer, 2013):

- $ROC=0.5$: Indica que no hay discriminación.
- $0.5 < ROC < 0.7$: Discriminación pobre.
- $0.7 \leq ROC < 0.8$: Discriminación aceptable.
- $0.8 \leq ROC < 0.9$: Discriminación buena.
- $ROC \geq 0.9$: Discriminación excelente.

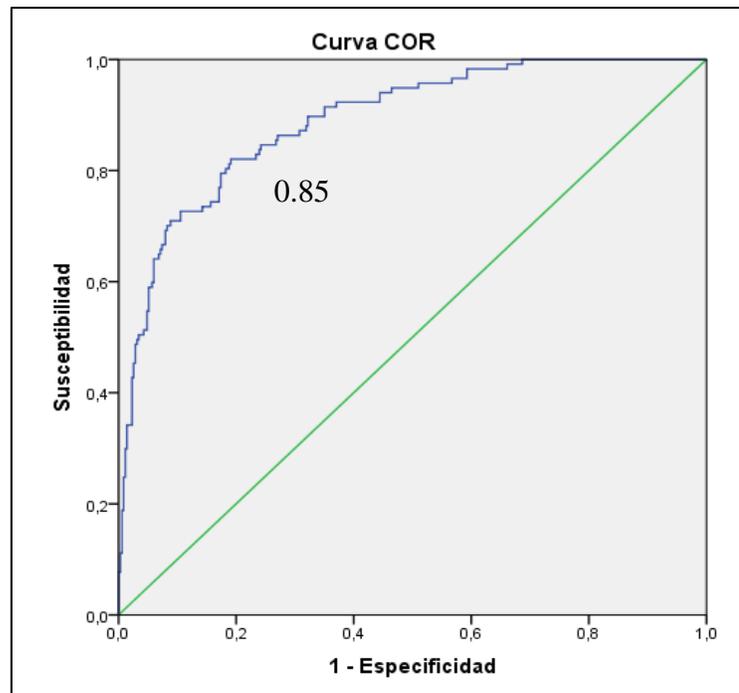


Figura 16. Ejemplo de Curva ROC.

2.4.5. Usos actuales de Regresión logística

La regresión logística presenta una gama de usos en la actualidad, dentro de los cuales destaca su aplicación con gran éxito en áreas como la economía y medicina. Junto a esto, la literatura documenta otro uso aplicado en las ciencias de la tierra, particularmente a la predicción de derrumbes en zonas montañosas de Bélgica (Van Den Eeckhaut et al, 2006).

En el presente, se observan aplicaciones de la regresión logística en la minería. Lo anterior, bajo el enfoque principal de la predicción de entrada de agua-barro en Block/Panel Caving (Navia et al, 2014) (Valencia, 2016). Además, existe la tendencia del uso de esta herramienta en otros tópicos tales como: ictiología, veterinaria, sociología, estudios descriptivos, bioestadística, etcétera.

2.5. Conclusiones del capítulo

A partir de la revisión del estado del arte se concluye que la dilución es una parte integral de una operación minera de hundimiento y por ende entender cuáles son las variables que influyen y el cómo afectan en la entrada de dilución juega un rol fundamental para la envolvente económica de un proyecto minero subterráneo.

En la actualidad, existen herramientas con capacidades limitadas (en términos de su capacidad de cálculo y errores asociados) para llevar a cabo una estimación de la dilución en un plan minero. Consecuente con lo anterior, se destaca que el gran problema de los softwares y herramientas actuales recae en las bajas confiabilidades con la que realizan la estimación de dilución, principalmente aquella cuyo mecanismo de entrada es lateral. Además, dichas estimaciones presentan una naturaleza de largo plazo, no siendo capaces de emular el fenómeno de ingreso de dilución a una escala operacional.

Dada la situación, se recomienda llevar a cabo la construcción de modelos de regresión logística multivariable que permitan estudiar el riesgo de ingreso de dilución. Dicha herramienta presentaría utilidad en términos evaluación de estrategias de explotación que permitan retrasar el ingreso de dilución y aumentar la recuperación de las reservas para minería de caving.

Junto a lo anterior, el uso de regresión logística también permitiría llevar a cabo análisis de escala operacional y proyectarlos hacia el largo plazo. Además, su uso puede aplicarse en fenómenos raros como lo es la presencia de dilución en la base de datos a estudiar.

A partir de las recomendaciones y enfoques de los diversos autores, es posible considerar que en una primera instancia las variables independientes expuestas en la Tabla 7 influyen en el fenómeno de estudio y en consecuencia su incorporación a los modelos debe ser evaluada.

Tabla 7. Variables independientes y su tipo para el fenómeno en estudio.

Variable Independiente Posible de Obtener	Tipo	Variable Independiente No Posibles de Obtener	Tipo
Índice de Uniformidad	Operacional	Fragmentación	Entorno
Porcentaje de columna extraída y Velocidades	Operacional	Sismicidad	Operacional
Estado de vecinos	Entorno	Medida de Pre-Acondicionamiento	Entorno
Litología (alturas de columna)	Entorno		

Conforme a la revisión bibliográfica, y a partir de las variables posible de obtener, se describen sus comportamientos esperando en la siguiente tabla.

Tabla 8. Comportamientos esperados de las variables.

Variable	Tipo	Comportamiento esperado	Coef. Beta
Columna Extraída	Operacional	Conforme aumenta la extracción, el riesgo de ingreso de dilución también lo hace.	Positivo
Altura de Columna	Entorno	A mayor altura de columna será más tardío el ingreso de dilución.	Negativo
Estado Vecinos	Entorno	Ante la presencia de vecinos diluidos se espera dilución lateral en el punto de extracción.	Positivo
Uniformidad	Operacional	A mayor uniformidad de tiraje se tendrá un retraso del ingreso de dilución.	Negativo
Velocidad	Operacional	Conforme aumenta la velocidad de extracción también lo hará la probabilidad de ingreso de dilución.	Positivo

Finalmente, cabe destacar que la variable dependiente a evaluar corresponde a la determinación del riesgo de entrada de dilución en un punto de extracción a una escala operacional. El uso de esta variable Y permitiría, en una primera instancia, tomar decisiones respecto al tiraje del punto en un intervalo de tiempo más razonable. Lo anterior dado que la evaluación será semanal/mensual, permitiendo tener una reacción ante un nivel de dilución no crítico.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En la presente sección se expone el detalle de la metodología utilizada para llevar a cabo la construcción, calibración y validación de los modelos conceptuales de riesgo al ingreso de dilución, además del estudio de la influencia del conjunto de variables en torno a ella. La metodología se compone de 3 etapas principales, las cuales tienen como objetivo abordar la entrada de dilución basándose en el análisis de datos históricos de una operación de Panel Caving. Las etapas corresponden a las siguientes:

- Etapa 1: Back-análisis de base de datos con el objetivo de establecer hipótesis de entrada de dilución en los puntos de extracción y llevar a cabo un análisis exploratorio. Junto a lo anterior, se tiene la determinación y cálculo de variables independientes influyentes y dependiente a evaluar.
- Etapa 2: Preparación de la base de datos para la construcción de modelo. Construcción, calibración y validación de modelos predictivos multivariados.
- Etapa 3: Análisis de la capacidad predictiva de los modelos.

3.2. Metodología

El tema a desarrollar en el trabajo de memoria corresponde a la construcción, calibración y validación de modelos multivariados de ingreso de dilución mediante el uso de regresión logística. Para ello, la base de datos de trabajo corresponde al modelo de bloques del Panel III de Andina y sus puntos con historial completo de explotación diaria desde enero del 2006 hasta enero del 2012 para los sectores Parrillas y LHD (véase Figura 17 y Tabla 9).

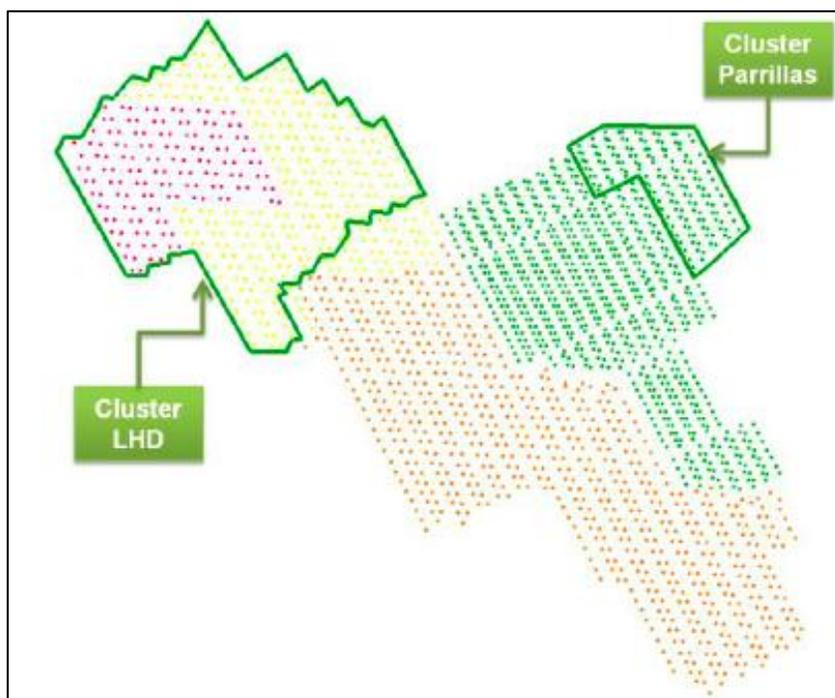


Figura 17. Clusters de dilución y vista en planta de los puntos de extracción del Panel II de Andina. Paredes, 2012.

Tabla 9. Descripción de Información recolectada por Paredes (2012).

División	Sector Productivo	Información General	Tonelajes y leyes extraídas	Estimación de Dilución
Andina	Cluster LHD	Modelo de Bloques.	Tonelaje y leyes extraídas a escala de turno.	Estimación de contenido de dilución correspondiente a riolita y quebrado a través de observaciones en puntos de extracción.
	Cluster Parrillas	Cotas de NP y NH.		
			Historial completo de puntos de extracción (2006-2012).	

Para cumplir con los objetivos planteados respecto a la construcción de los modelos, se propone una metodología que permita el desarrollo de éstos. Las etapas a seguir se describen a continuación.

Etapa 1: Back Análisis

La primera etapa corresponde a la recopilación y análisis de base datos y antecedentes. Se considera un filtrado de los datos y estudio exploratorio. Los aspectos a desarrollar a partir de lo anterior corresponden a los siguientes:

- Determinar las variables principales influyentes en el fenómeno de ingreso de dilución.
- Determinar y eliminar datos outliers.
- Despliegue de modelo de bloques y análisis de los elementos de dilución presentes.
- Plantear hipótesis de ingreso de dilución a los puntos de extracción.

Particularmente, para la determinación de la variable dependiente, se propone el uso de lo determinado por Paredes (2012), correspondiente a el riesgo de entrada de dilución acumulada al 3%. Lo anterior dado que antes de alcanzar este nivel de dilución, se observa un comportamiento general de tipo pulso de ésta en los puntos de extracción. Por otro lado, a partir de una dilución acumulada al 3%, se observa un comportamiento constante en su ingreso.

Inicialmente, según los antecedentes teóricos, las principales variables independientes y elementos a ingresar al modelo corresponderían a los siguientes:

- Condiciones de Entorno: Presencia de pre-acondicionamiento, altura de columna, litología, distancia de puntos de extracción a puntos de vaciado y vecinos con presencia de dilución.
- Condiciones Operacionales: Porcentaje de extracción, velocidades y uniformidad de tiraje.

Luego, se deben calcular las variables principales determinadas en el paso anterior, considerando rangos o temporalidades diferentes según corresponda. Además, se debe realizar un estudio de asociación de variables mediante análisis univariados y multivariados de las variables calculadas.

Finalmente, es trascendente señalar que variables importantes, según los diferentes trabajos de autores expuestos en la sección anterior, podrían quedar fuera del modelo, lo cual básicamente se debe a una falta de datos respecto a ellas.

Etapa 2: Preparación de base de datos. Construcción, calibración y validación

La preparación de la base de datos se realiza conforme a las diversas variables calculadas que fueron determinadas influyentes en la etapa anterior, tanto de forma estadística como teórica. Ante la determinación del evento, se tendrá un número ($Y=1$) pequeño en comparación a la no ocurrencia del evento ($Y=0$). Conforme a lo anterior, se realiza la preparación de la base de datos para la

construcción de modelos en base a eventos raros, fijando una proporción de un 25% y 75% de datos para la ocurrencia y no ocurrencia del evento respectivamente (véase Figura 18).

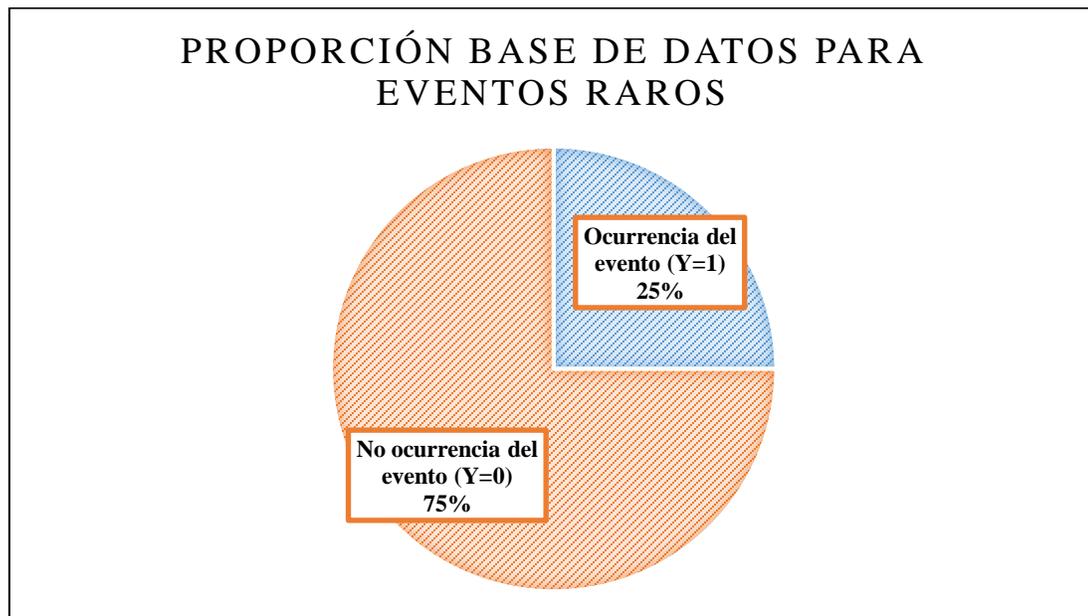


Figura 18. Construcción de base de datos para eventos raros.

A partir de la base de datos para eventos raros se lleva a cabo la construcción de modelos multivariados de riesgo al ingreso de dilución. Los modelos de regresión logística se construyen en base a una selección intencional de variables, teniendo como enfoque general para su construcción los siguientes aspectos:

- Selección de variables que resulten en un buen modelo, junto con que tengan un contexto científico en el problema.
- Enfoque tradicional en el sentido de la búsqueda del modelo más parsimonioso que refleje con precisión verdadera los resultados de los datos. Menos variables hace que el modelo sea numéricamente más estable y más fácil de usar, además de quitar ruido.
- Eventual consideración de variables que no sean significativas estadísticamente. Estas pueden ser incluidas si su contexto y conocimiento indican que son relativamente importantes. Así, pueden ser considerables de forma colectiva con otras variables en medida que no afecten la calidad del modelo.

Conforme los enfoques generales expuestos para la construcción de modelos, se plantea su generación mediante una selección intencional de variables dada por los siguientes pasos:

1. Análisis univariable para cada variable independiente. Mediante el análisis se identifican candidatos para el modelo. Todas las variables con valor de significancia menor a 0.25 o 0.20 se consideran clínicamente importantes. Lo anterior se recomienda utilizar como criterio inicial para la selección de variables para una base de trabajo.
2. Ajustar el modelo multivariable considerando todas las variables importantes del paso 1. Se evalúa la importancia de cada variable mediante el uso del valor del estadístico de Wald. Variables que no contribuyen a niveles típicos (menor a 0.05), no son incluidas en el modelo ajustado. El modelo ajustado se va comparando con el modelo que contiene todas las variables.
3. Comparación de valores de los coeficientes estimados en el modelo ajustado versus el modelo completo. Si un coeficiente varía más de un 20% en magnitud, se infiere que una de las variables eliminadas tiene importancia en el sentido de proveer un ajuste a las variables remanentes del modelo (modificadoras de efecto), por lo cual no deben ser eliminadas y se agregan de vuelta al modelo. El paso anterior se repite cíclicamente para las variables agregadas y eliminadas.
4. Añadir cada variable no seleccionada en el paso 1 al modelo obtenido al término del paso 3, una a la vez y verificando su significancia. Este paso es importante para revisar si se descartaron variables que por sí mismas no son relevantes, pero si lo es su contribución en presencia de otras variables.
5. Examinar más detalladamente las variables resultantes. Que sean apropiadas las categorías y su comportamiento en términos de aumentar o disminuir el riesgo de ocurrencia del evento.

Consecuente a lo anterior, el modelo predictivo será calibrado teóricamente utilizando la sensibilidad y especificidad del modelo, además de la extracción histórica de la mina y sus sectores analizados, donde la probabilidad de entrada de dilución será estimada por día utilizando simulaciones a partir del modelo predictivo. El objetivo de esta segunda calibración es establecer la probabilidad de corte que precisa entrada de dilución en un punto de extracción bajo la minimización de la diferencia de tonelaje extraído antes de la entrada de dilución entre datos reales y datos modelados para cada punto de extracción.

Finalmente, se propone evaluar el grado de contribución de las variables, bondad de ajuste y realizar validación de los modelos resultantes a partir de la base de datos completa del sector en estudio e hipótesis asociadas.

Etapa 3: Análisis y recomendaciones

En esta última etapa, se llevan a cabo los análisis y recomendaciones respectivas para los modelos construidos, variables presentes e hipótesis planteadas; estudiando su influencia y comportamiento en la entrada de dilución. Además, tanto para validar como para analizar los modelos, se propone el uso de matrices de contingencia a fin de obtener indicadores para el desempeño del estimador y evaluar su calidad predictiva.

A continuación, a modo de complemento de la metodología anteriormente expuesta, se presenta un mapa esquemático a fin de generar mayor claridad en los desarrollos generales planteados para a llevar a cabo para la construcción de los modelos en el presente trabajo de memoria.

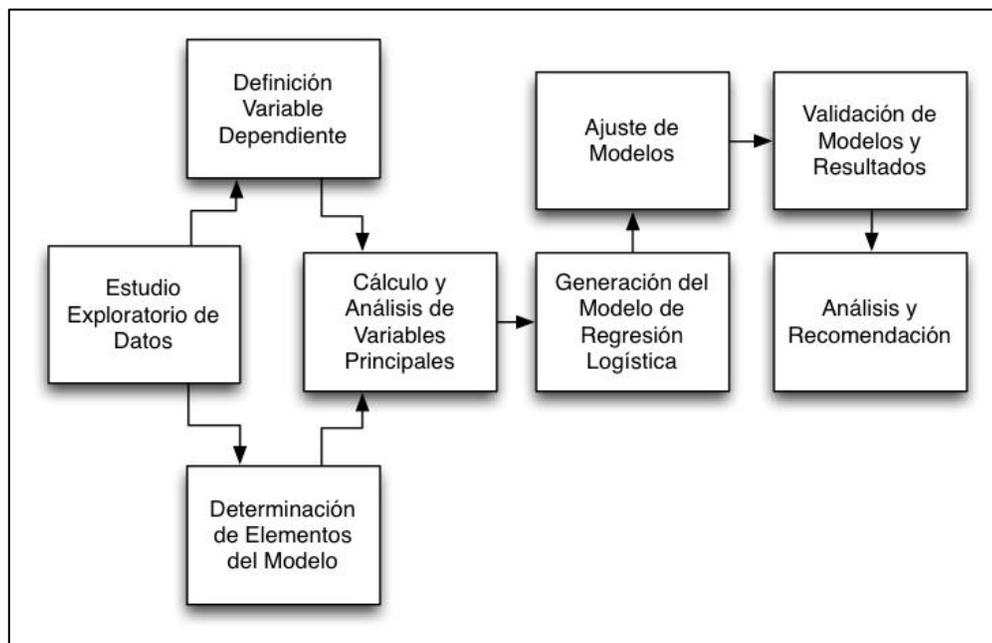


Figura 19. Pasos para la construcción de modelos.

3.3. Conclusiones del capítulo

Dado el alto impacto que genera el comportamiento de la dilución en la minería de caving, se propone llevar a cabo un estudio que permita generar una herramienta predictiva ante el riesgo de su ingreso en los puntos de extracción por medio del uso de modelos de regresión logística.

En el presente capítulo se expuso la metodología propuesta para la construcción de la herramienta predictiva de ingreso de dilución. Los pasos señalados permiten llevar a cabo una propuesta de hipótesis de ingreso de la dilución a los puntos de extracción y la generación de modelos en torno a ellas.

Junto a lo anterior, se presentan las variables independientes a determinar a partir de la base de datos proporcionada, para así evaluarlas en la construcción de modelos.

Finalmente, se explicitaron los métodos de construcción de los modelos propuestos, cuyos resultados obtenidos y análisis efectuados son expuestos en los capítulos siguientes.

El próximo capítulo explica el análisis de la base de datos y las variables a considerar en la construcción de los modelos. En conjunto a lo anterior, se plantean las hipótesis de ingreso de dilución a los puntos de extracción.

CAPÍTULO 4

BACK ANÁLISIS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se detalla el estudio exploratorio de la base de datos y el planteamiento de hipótesis a partir de los mecanismos de ingreso de dilución observados y comportamientos determinados por Paredes (2012) para la misma base de datos de trabajo. Además, se muestra el estudio de cada una de las variables influyentes en el fenómeno de ingreso dilución, las cuales son seleccionadas a partir de la revisión bibliográfica y su capacidad de ser determinadas desde base de datos de trabajo. Lo anterior bajo el objetivo de sentar precedentes ante la posterior construcción de modelos.

4.2. Estudio exploratorio de base de datos

4.2.1. Descripción de base de datos

La base de datos completa manipulada corresponde a colección de datos del Panel III de Andina. Los datos cuentan con información referente a la extracción diaria por punto de extracción desde diciembre del año 1995 hasta enero del año 2012, sus leyes correspondientes y cuantificación de elementos diluyentes. Junto a lo anterior, se cuenta con información general asociada al modelo de bloques y disposición de puntos de extracción.

Desde el punto de vista de la construcción de modelos de riesgo a la entrada de dilución, la información más relevante de la colección de datos corresponde a la estimación del contenido de dilución a través de marcadores geológicos. Particularmente, para el caso del Panel III de Andina, la información referente al muestro de dilución se tiene a partir de enero de 2006, donde personal capacitado de Geología comienza a recabar información de los elementos diluyentes observados en los puntos de extracción. Los elementos diluyentes observados corresponden a material quebrado proveniente del Panel II explotado con anterioridad, y riolita cuyo origen se asociada a la chimenea riolítica ubicada al noreste del Panel III (véase Figura 20).

Los niveles de producción y hundimiento del Panel III cuentan con el contacto litológico de roca primaria y secundaria, asociados principalmente a los sectores LHD y Parrillas de forma respectiva. Ambos sectores poseen diferentes mallas de extracción, manejos de materiales y condiciones de

borde respecto a la dilución, por lo cual posteriormente su análisis será llevado a cabo de forma separada para construir los modelos de riesgo.

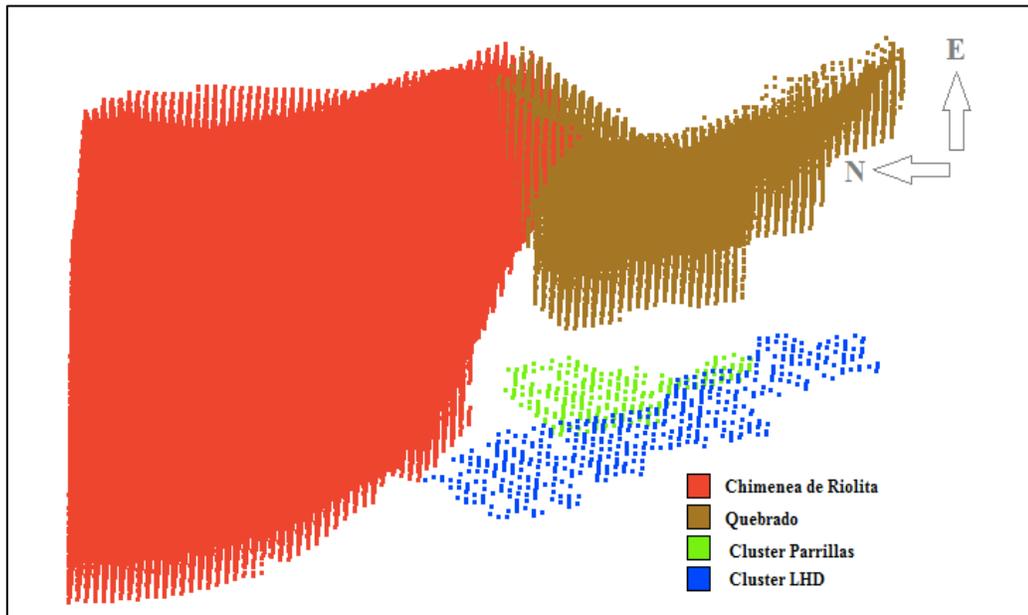


Figura 20. Vista Isométrica. Disposición de clusters y elementos diluyentes, Panel III Andina.

Dado que la información de dilución del Panel III de Andina existe desde el año 2006 en adelante, y a fin de contar con toda la información a lo largo de la vida de los puntos de extracción, se define el universo de puntos a analizar como todos aquellos que fueron abiertos desde enero de 2006. De esta manera, quedan definidos 2 clusters de dilución, el primero compuesto por los puntos del sector de LHD que fueron abiertos desde enero de 2006 en adelante y el segundo por sus homólogos en el sector Parrillas, abiertos desde junio del mismo año (véase Figura 21).

Finalmente, como parte del estudio exploratorio, en la Figura 21 se expone la secuencia de extracción observada a lo largo del tiempo para ambos sectores. Además, en la Tabla 10 se resume la información estadística de la base de datos a utilizar, a partir de la cual se desprende una disminución alta de puntos a analizar con respecto a totalidad de puntos de extracción.

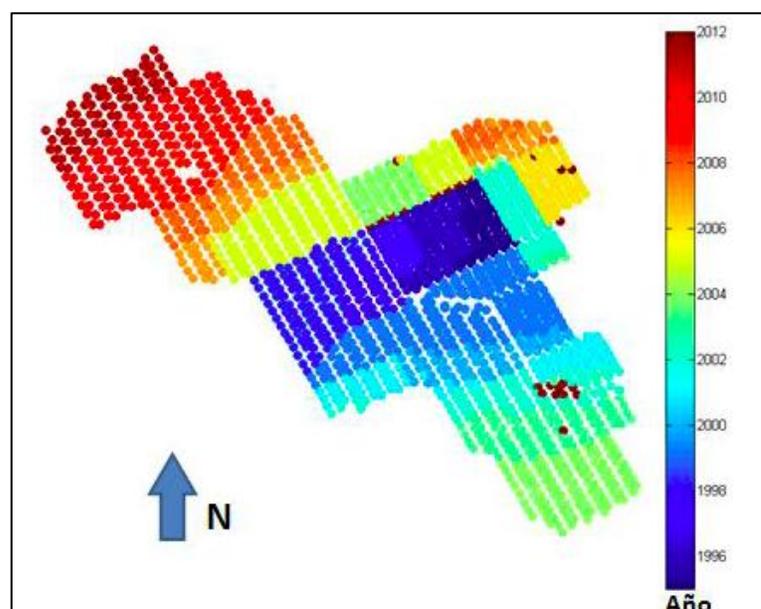


Figura 21. Vista en planta de secuencia de extracción del Panel III de Andina. Paredes, 2012.

Tabla 10. Número de puntos por sector a analizar.

Cluster	Malla [mxm]	Número de puntos de Extracción	Puntos a analizar
Parrillas	9x9	896	149
LHD	15x15	1,138	397

A partir de la Figura 21 es posible observar que existe una clara diferencia temporal en la extracción de los diversos paneles de los sectores, comenzando en el sector de Parrillas e incorporando área con avance hacia el suroeste. Posteriormente, a partir del año 2000, se comienza a avanzar hacia el sureste, y luego al noreste en el 2004. Finalmente, se abren los paneles correspondientes a los clusteres de dilución que se fueron evitando.

4.2.2. Análisis de entrada de dilución en el Cluster Parrillas

A partir de las condiciones dadas, el Cluster Parrillas cuenta con 149 puntos de extracción con información de junio de 2006 hasta julio de 2010, de los cuales la totalidad alcanza la condición de dilución acumulada al 3%. Las estadísticas de extracción del sector se pueden observar en la Tabla 11 y Figura 22.

Tabla 11. Estadísticas de extracción Parrillas.

Estadísticas de extracción						
Cluster	Número de puntos		Tonelaje Extraído		Número de períodos [meses]	Tonelaje Total Extraído [kton]
	Con extracción	Con dilución (3%)	Media [kton/mes]	Desviación Estándar [kton/mes]		
Parrillas	149	149	151	90	50	7,537

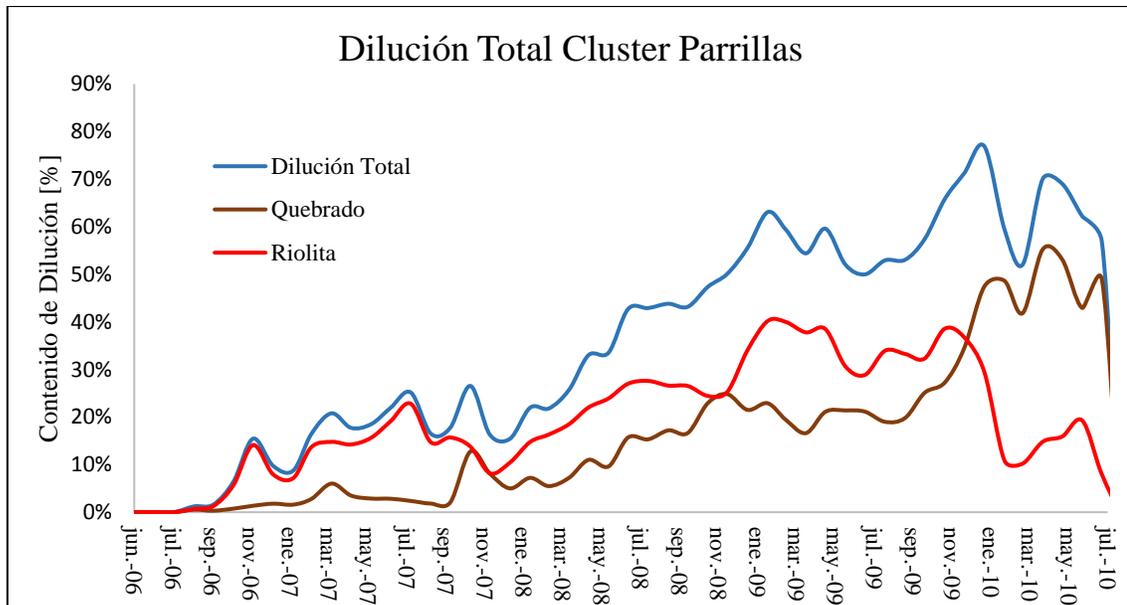


Figura 22. Dilución promedio Cluster Parrillas.

A partir de la figura anterior, es posible observar que dilución presenta una entrada temprana a tan solo 3 meses de la apertura de los primeros puntos para este sector. La dilución entrante durante el transcurso de los primeros meses corresponde principalmente a riolita, esto a causa de la apertura de puntos ubicados bajo la proyección de la chimenea riolítica. Por su parte, se observa una baja presencia de material quebrado durante los primeros meses de extracción, teniendo así una entrada más tardía y gradual, la cual se asocia a la baja cantidad de puntos ubicados inicialmente bajo su proyección. Además, se observa que ambos elementos diluyentes demuestran una presencia creciente a lo largo del tiempo y los niveles máximos de contenidos de dilución total, correspondiente a riolita más quebrado, son observados para el mes de diciembre del 2009, oscilando en torno a un 70%, y 80%.

Bajo el enfoque de la variable de ingreso de dilución acumulada al 3%, el ingreso de dilución observado para el sector Parrillas según elemento diluyente se expone en la siguiente tabla:

Tabla 12. Resumen de ingreso de dilución acumulada (3%) para Parrillas.

Dilución	Número de puntos	Fecha de ingreso al primer punto	Columna extraída promedio [%]
PED(3%)	149	23-09-06	46%
PEQ(3%)	127	24-09-06	60%
PER(3%)	141	19-10-06	49%

Para el caso de la dilución total acumulada (3%) en el sector Parrillas (véase Figura 23), se observa una distribución de carácter similar a una exponencial, presentándose un ingreso de dilución acumulada al 3% mayoritariamente cuando se tiene entre un 1 % y 50% de columna extraída.

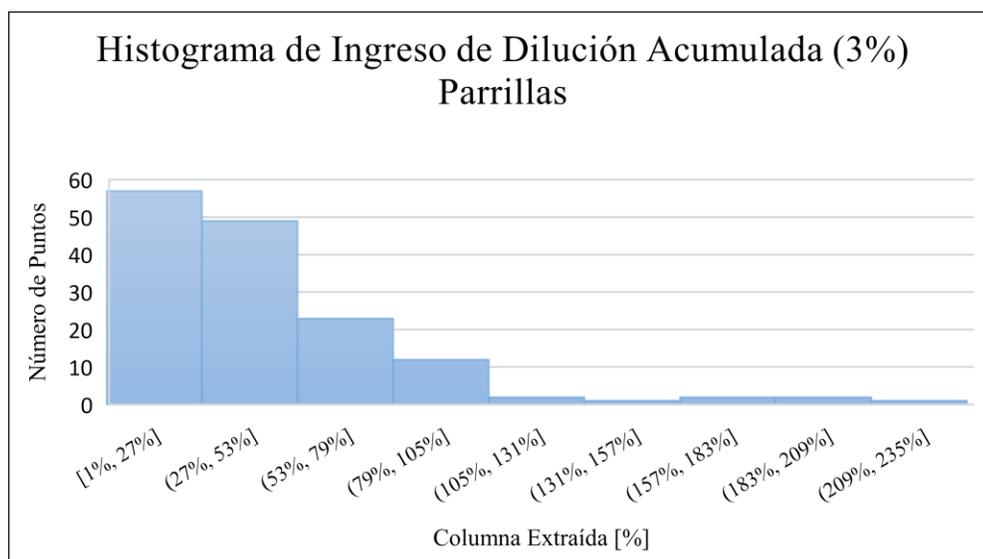


Figura 23. Histograma dilución acumulada, Parrillas.

Finalmente, en la Figura 24 se exponen de forma gráfica la secuencia de explotación del cluster y el registro del evento de entrada de dilución acumulada al 3% por punto.

Como es posible de apreciar en la Figura 24, se observa que el ingreso de dilución acumulada al 3% durante los años 2006 y 2007 está dado para aquellos puntos de extracción abiertos en una primera instancia en el año 2006, y adyacentes al sector anteriormente explotado. Junto a esto, es posible inferir que el ingreso de dilución para puntos contiguos está dado generalmente para el mismo período o períodos consecutivos. Además, se observa que el evento en general transcurre durante el mismo año de apertura del punto de extracción, o uno posterior. Junto a lo anterior, se

infiere que el ingreso de dilución para el sector no se presenta para puntos dispersos, sino que va conforme aumenta el porcentaje de columna extraída y para puntos adyacentes a puntos previamente explotados.

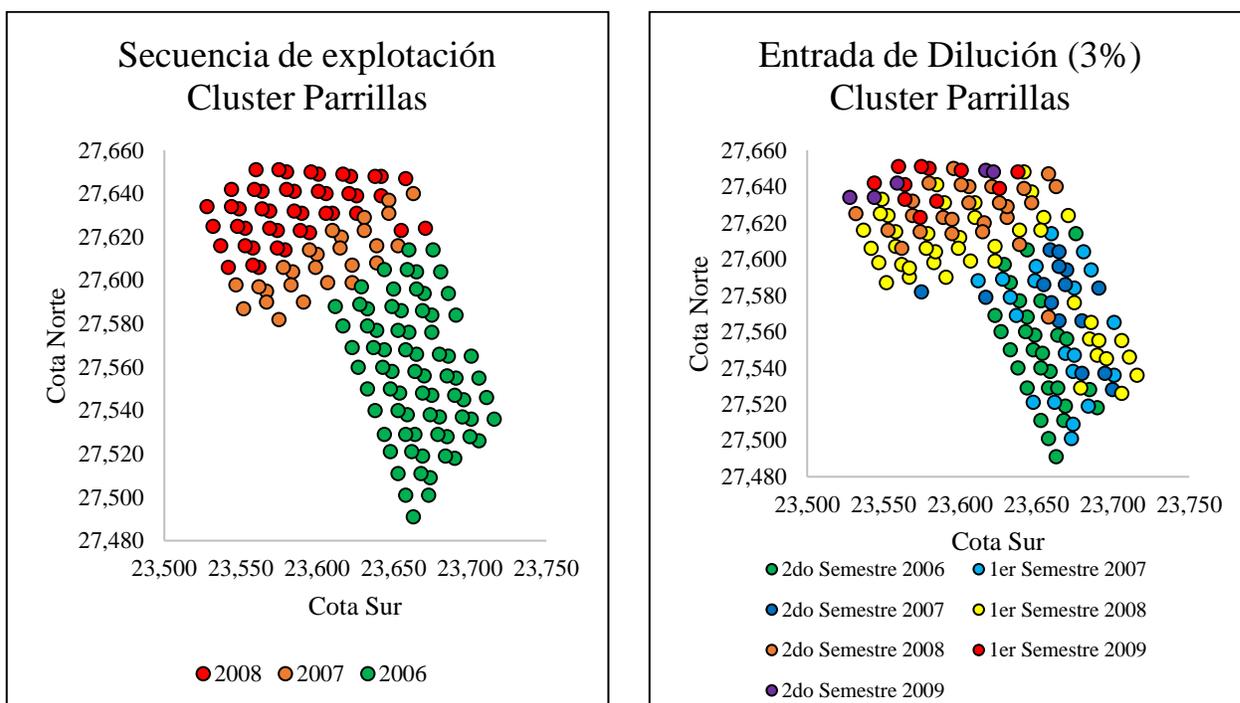


Figura 24. Secuencia de explotación y entrada de dilución acumulada (3%), Parrillas.

4.2.3. Análisis de entrada de dilución en el Cluster LHD

El Cluster LHD consta con información de 397 de puntos de extracción, de los cuales 117 alcanzan una dilución acumulada al 3% durante el transcurso de enero de 2006 hasta enero de 2012. Las estadísticas y características presentadas por el sector durante el transcurso de los períodos de análisis se exponen en la Tabla 13 y Figura 25.

Tabla 13. Estadísticas de extracción LHD.

Estadísticas de extracción de los Clusters						
Cluster	Número de puntos		Tonelaje Extraído		Número de períodos [meses]	Tonelaje Total Extraído [kton]
	Con extracción	Con dilución (3%)	Media [kton/mes]	Desviación Estándar [kton/mes]		
LHD	397	117	371	353	94	27,098

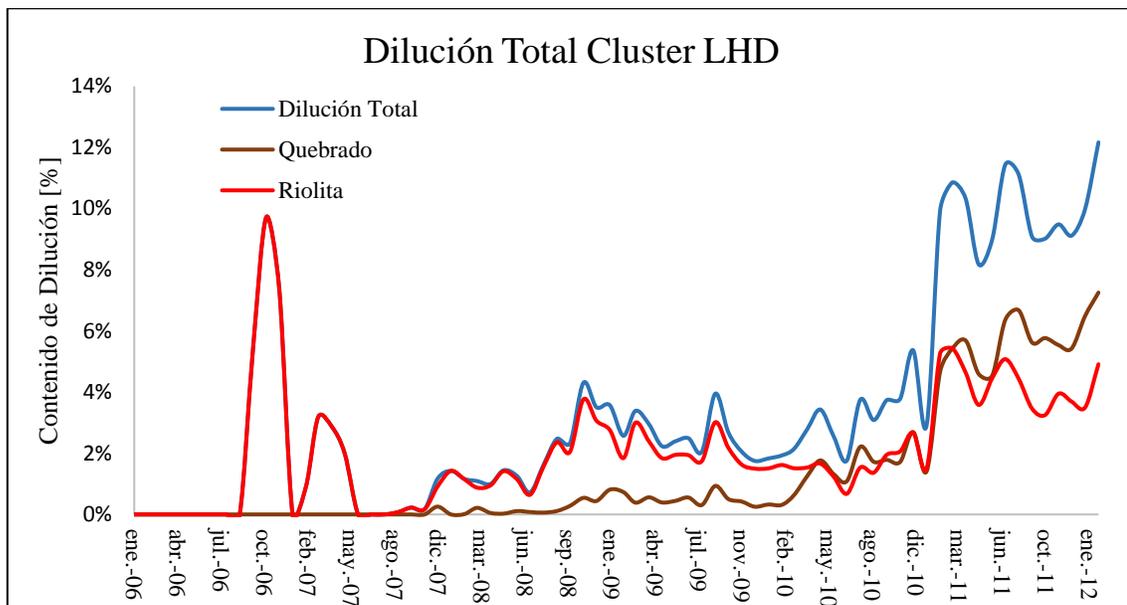


Figura 25. Dilución promedio Cluster LHD.

A partir de la figura anterior, es posible observar que dilución presenta una entrada a 8 meses de la apertura de los primeros puntos para este sector, alcanzando pronto un peak cercano al 10% de contenido de dilución. La dilución entrante durante el transcurso de los primeros meses corresponde principalmente a riolita, esto a causa de la apertura de puntos ubicados bajo la proyección de la chimenea riolítica. Por otro lado, se observa un comportamiento de entrada más tardío y gradual para el material quebrado proveniente del Panel II ya explotado. Bajo la misma línea anterior, se observa que ambos elementos diluyentes demuestran una presencia con comportamiento creciente a lo largo del tiempo, la cual se observa particularmente a partir de noviembre del 2007, terminando con sus niveles máximos de contenidos de dilución total en el mes de enero de 2012, los cuales oscilan en torno al 12%.

Bajo el enfoque de la variable de ingreso de dilución acumulada al 3%, la entrada de dilución observada para el Cluster LHD, según elemento diluyente, se expone en la siguiente tabla:

Tabla 14. Resumen de ingreso de dilución acumulada (3%) para LHD.

Dilución	Número de puntos	Fecha de ingreso al primer punto	Columna extraída promedio [3%]
PED(3%)	117	07-11-06	46%
PEQ(3%)	95	09-01-09	53%
PER(3%)	56	07-11-06	53%

En complemento a lo anterior, para el caso de la dilución total, en la Figura 26 se observa una distribución de carácter normal, presentándose un ingreso de dilución acumulada al 3% mayoritariamente cuando se tiene entre un 30 % y 60% de columna extraída.

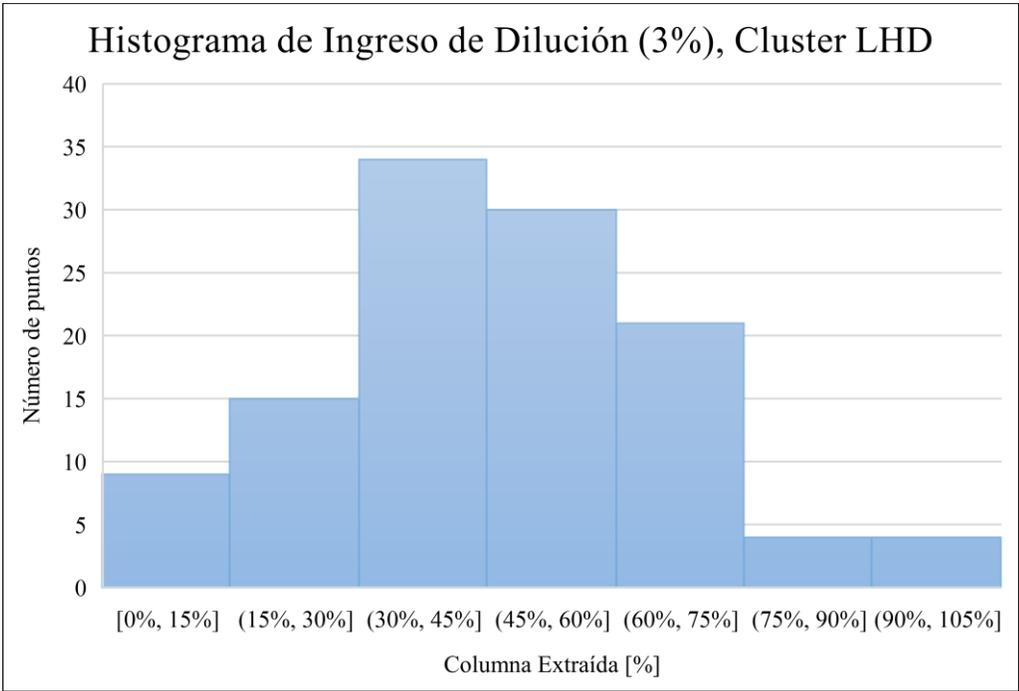


Figura 26. Histograma dilución acumulada, LHD.

Finalmente, al igual que para el sector Parrillas, en la Figura 27 se exponen de forma gráfica una vista en planta de la secuencia de explotación del Cluster LHD y el registro del evento de entrada de dilución acumulada al 3% por punto. Además, en la Figura 28 se expone una vista en planta de las alturas de columna a comienzo del año 2006. Lo anterior a fin de establecer el avance y alturas de columna in-situ en los alrededores de Clusteres de dilución a analizar. A partir de ello, se desprende que existen mayoritariamente alturas entre los 200 y 300 metros en los sectores aledaños al Cluster LHD a explotar, cuyas alturas de columna oscilan entre los 300 y 600 metros mayoritariamente.

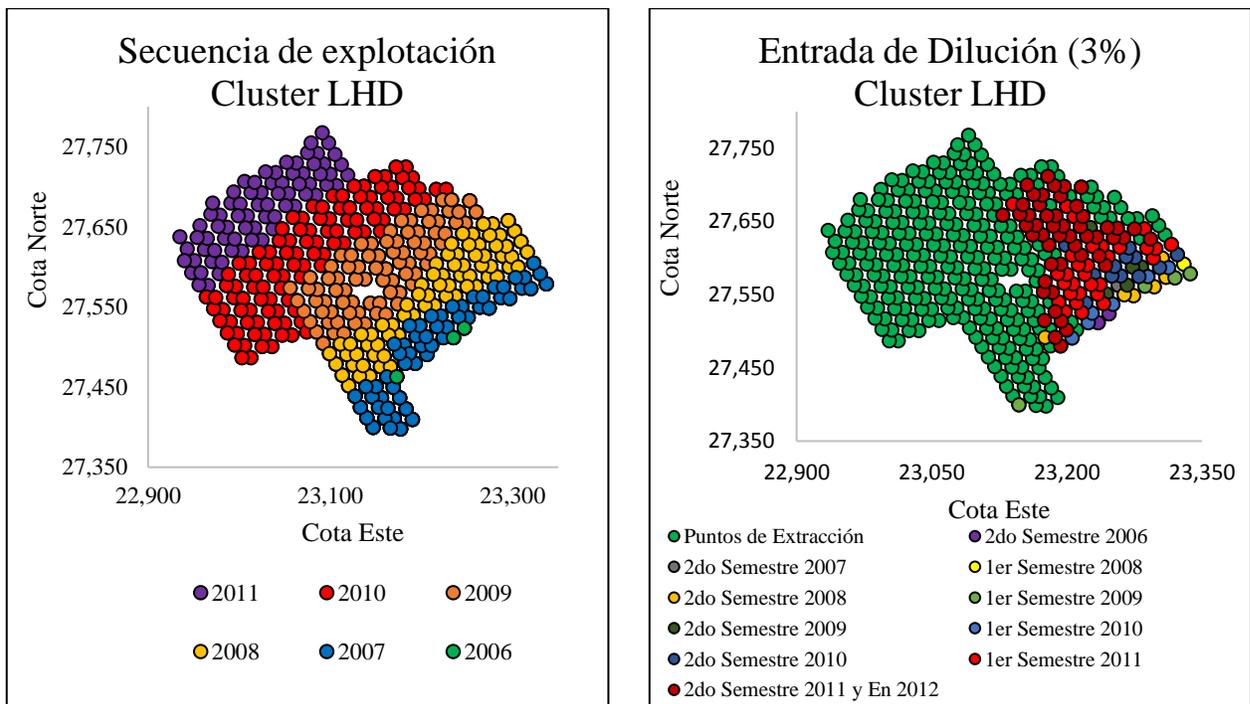


Figura 27. Secuencia de explotación y entrada de dilución acumulada (3%), LHD.

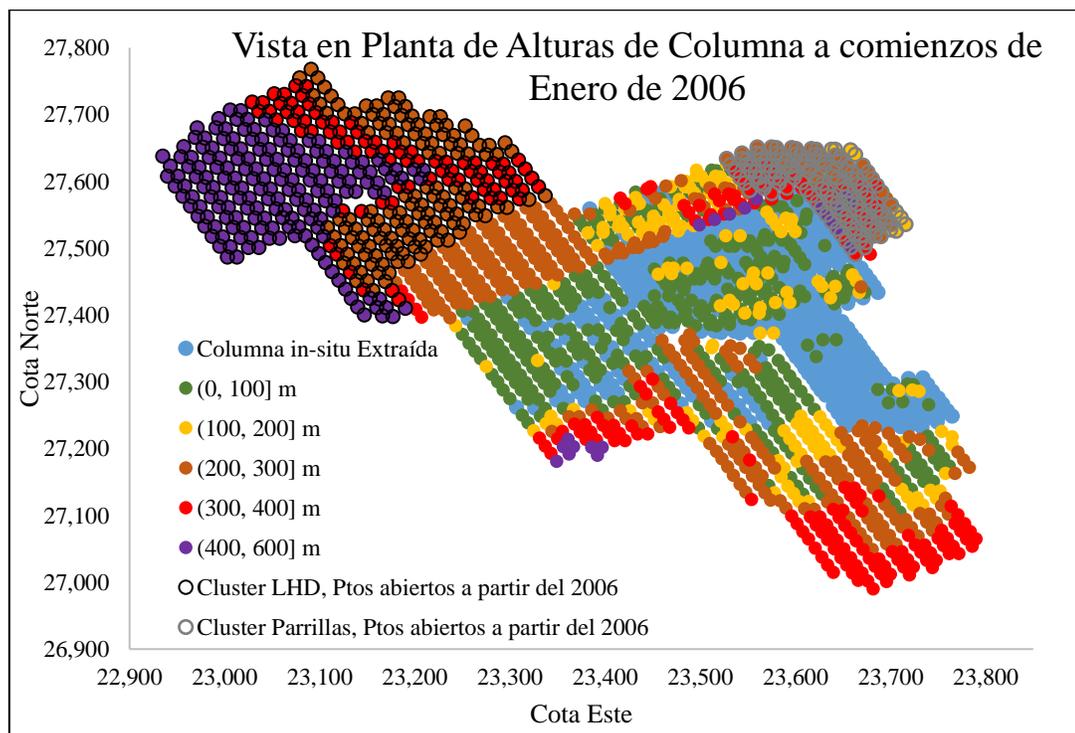


Figura 28. Alturas de columna al momento de iniciar la explotación en los clústeres de dilución en estudio.

Conforme a la figura anterior, se observa que el ingreso de dilución acumulada al 3% durante el primer año está dado para aquellos puntos de extracción abiertos en una primera instancia y

adyacentes al sector anteriormente explotado. Junto a esto, es posible inferir que el ingreso de dilución para puntos contiguos está dado generalmente para el mismo período o períodos consecutivos. Además, en general el ingreso de dilución para el sector no se presenta para puntos dispersos, sino que va conforme aumenta el porcentaje de columna extraída y para puntos adyacentes a puntos previamente explotados.

Particularmente, a partir de lo planteado tanto para el sector Parrillas como LHD, se infieren dos mecanismos de ingreso de dilución a los puntos de extracción. El primero está dado por el ingreso de dilución para algunos puntos de forma aislada asociada a una entrada vertical del diluyente, mientras que el segundo corresponde a un ingreso lateral observado para aquellos puntos con vecinos ya diluidos, siendo este último el mecanismo más frecuente. No obstante, es posible destacar que los bajos rangos de tiempos de entrada de dilución entre puntos de extracción cercanos, sumado a la presencia de un mecanismo vertical global que gobierna al sector según Paredes (2012), permite plantear la presencia de un mecanismo generalizado que englobe los dos casos de ingreso anteriores.

4.2.4. Hipótesis de ingreso de dilución

A partir de lo planteado en el análisis de entrada de dilución, se desprende que existe un comportamiento persistente en el ingreso de dilución en los puntos de extracción. Particularmente, el comportamiento observado presenta una naturaleza similar a mecanismos ocurridos ante el ingreso de barro en los puntos de extracción (Navia, 2014), observándose una entrada inicial de dilución por su flujo vertical al punto de extracción, la cual luego se extiende lateralmente hacia los vecinos de los costados en medida que aumenta la extracción.

Conforme lo anterior, es posible generar modelos con usos interactivos y condicionados a la presencia o ausencia de vecinos diluidos. Así, ante la ausencia de vecinos con dilución acumulada al 3%, se utiliza un modelo de ingreso vertical. No obstante, ante la presencia de un nivel de dilución de 3% en el punto, los vecinos geométricos a éste se asocian a la evaluación mediante el mecanismo lateral. Lo anterior se explica de forma gráfica en la siguiente figura:

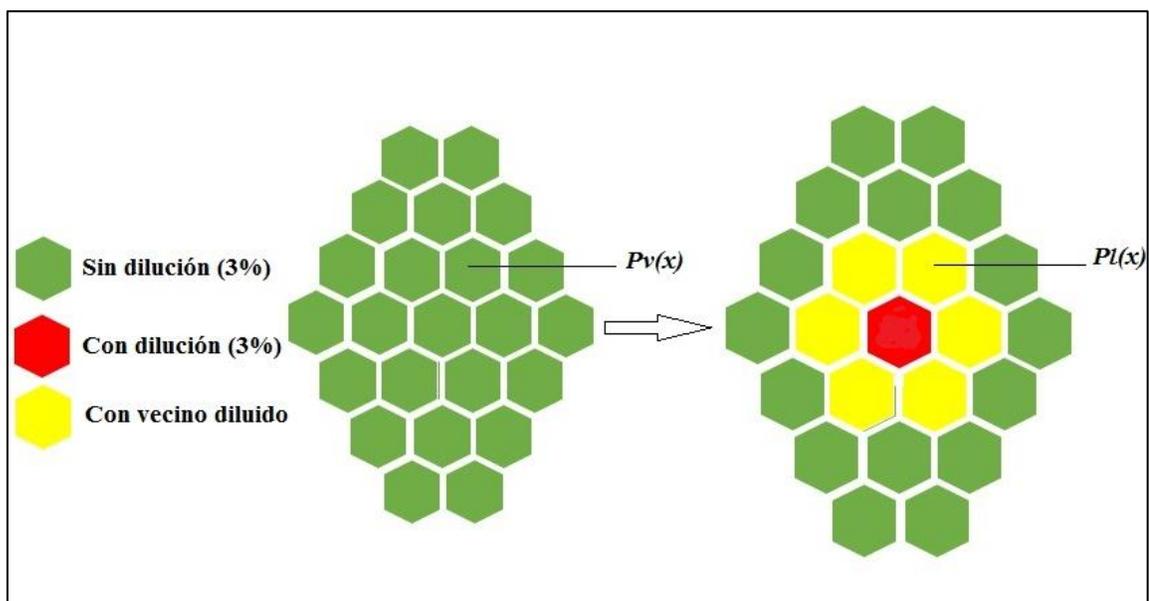


Figura 29. Interacción de modelo vertical y lateral ante ingreso de dilución.

Junto a lo anterior, en conjunto a los mecanismos planteados también se propone llevar a cabo una generalización del comportamiento mediante un mecanismo generalizado, esto dada la cercanía de ocurrencia de eventos y a modo de simplificación de los modelos. Así, a partir de las hipótesis de ingreso de dilución se desprenden las siguientes características de los modelos a construir, las cuales son detalladas en la Tabla 15 :

Tabla 15. Número de ocurrencia de eventos por modelo.

Sector	Período	Modelo	Puntos con Evento Dil(3%)
LHD	Enero 2006- Enero 2012	Generalizado	117/397
		Vertical	22/397
		Lateral	95/146
Parrillas	Junio 2006- Julio 2010	Generalizado	149/149
		Vertical	24/149
		Lateral	125/132

En síntesis, a partir de las hipótesis planteadas, es posible generar modelos interactivos basados en cada mecanismo de ingreso de dilución en los puntos de extracción, teniendo así la aplicación de un modelo de mecanismo de ingreso vertical si el punto no presenta vecinos diluidos, y un

mecanismo de ingreso lateral si existe la presencia de vecinos diluidos al 3%. Además, es posible evaluar un modelo mixto o generalizado que englobe ambos mecanismos mencionados.

4.2.5. Variables de los modelos

Un análisis cualitativo permite determinar que la variable a evaluar en los modelos predictivos corresponde al punto donde se registra entrada de dilución acumulada al 3%. Lo anterior, a partir de los trabajos y recomendaciones llevados a cabo por Paredes (2012) en conjunto a observaciones de entrada continua de dilución a partir de la ocurrencia de este evento (véase ANEXO A). Junto a esto, cabe destacar que la alternativa mencionada es acorde al enfoque del modelo, el cual corresponde a la determinación del riesgo de entrada de dilución en un punto de extracción a una escala operacional. El uso de esta variable dependiente admitiría, en una primera instancia, la toma de decisiones respecto a la explotación del punto en un intervalo de tiempo razonable, permitiendo tener una reacción ante un nivel de dilución no crítico.

A partir de los trabajos llevados a cabo por diversos autores, se desprende que un conjunto de variables es influyente a la hora de comprender el fenómeno de ingreso de la dilución y su comportamiento. Así, conforme la revisión bibliográfica, se tienen las siguientes variables importantes a evaluar y posibles de obtener a partir de la base de datos de trabajo:

- Condiciones de Entorno: altura de columna según litología y vecinos con presencia de dilución.
- Condiciones Operacionales: Porcentaje de extracción, velocidades y uniformidad de tiraje.

Del conjunto de variables anterior se destaca que es posible categorizar la naturaleza de las variables independientes que son influyentes en dos tipos: entorno y operacional. Junto a esto, el comportamiento esperado para cada una de las variables es planteado en la Tabla 8 de las conclusiones de la Revisión Bibliográfica.

A continuación, se lleva a cabo un estudio de cada una de las variables independientes planteadas anteriormente.

1. Altura de columna

Para el Cluster Parrillas las menores alturas de columna (bajo 400m) están asociadas a aquellos puntos ubicados debajo de la proyección de la chimenea riolítica. Las estadísticas de las alturas de columna del sector corresponden a las expuestas en la Figura 30 y la Tabla 16.

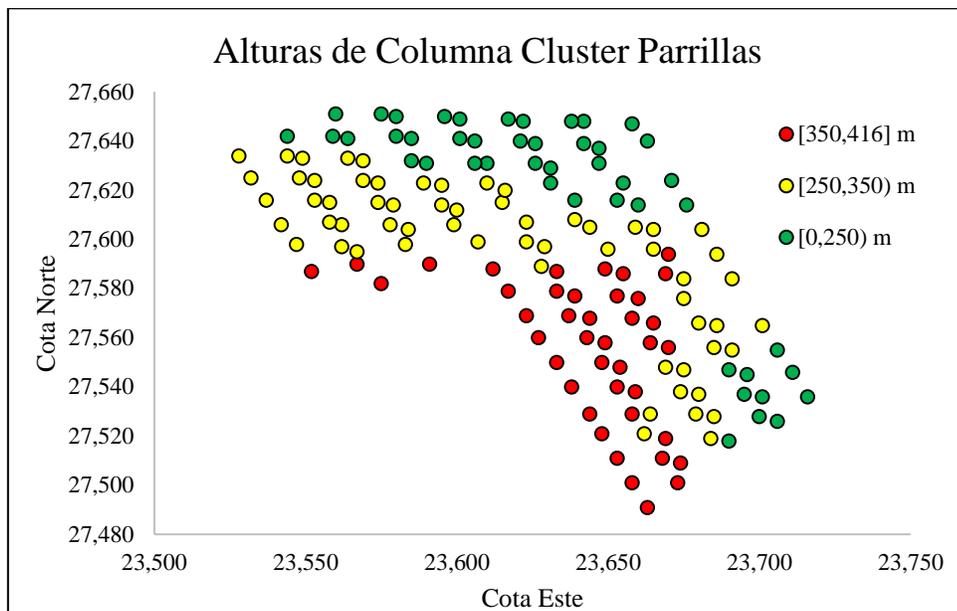


Figura 30. Alturas de columna, Parrillas.

Tabla 16. Alturas de columna, Parrillas.

Cluster Parrillas	Altura Secundario [m]
Promedio	292
Máximo	416
Mínimo	144
Desviación Estándar	66

Cabe destacar que las alturas de columna para el Cluster Parrillas están medidas a partir de la cota 3,206.5, correspondiente al nivel de producción. Además, se observa que los puntos a estudiar presentan solo material secundario en su columna.

Por otro lado, para el Cluster LHD las menores alturas de columna corresponden a aquellas que se encuentran bajo la proyección del material quebrado del Panel II ya explotado. Las estadísticas de las alturas de columna del sector corresponden a las expuestas en la Figura 30 y la Tabla 17.

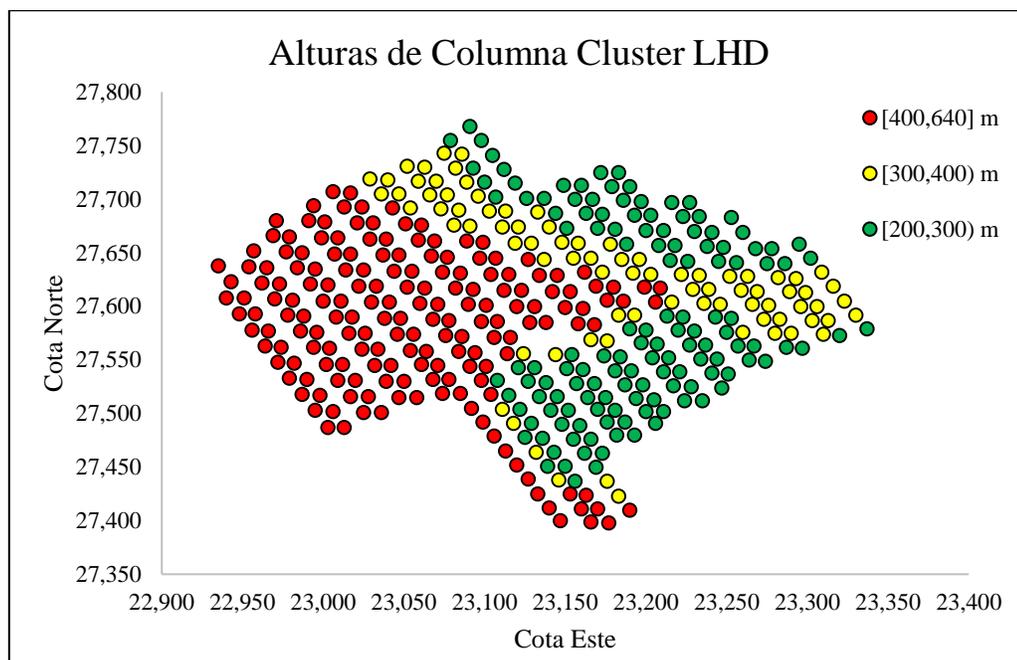


Figura 31. Alturas de columna, LHD.

Tabla 17. Alturas de columna, LHD.

Cluster LHD	Altura Primario [m]	Altura Secundario [m]	Altura Total [m]
Promedio	119	287	406
Máximo	256	496	640
Mínimo	0	16	208
Desviación Estándar	70	96	135

Las alturas de columna para el Cluster LHD son medidas a partir de la cota 3,230.5, equivalente al nivel de producción del sector. Junto a lo anterior, se observa que las columnas asociadas a cada punto de extracción en general presentan una mayor cantidad de material secundario que primario.

2. Vecinos con presencia de dilución acumulada al 3%

Los vecinos con presencia de dilución corresponden a una variable de tipo entorno, la cual mide el número de vecinos geométricos a un punto de extracción que presentan registro de dilución acumulada al 3%. Esta variable es evaluada en base al porcentaje de vecinos a fin de normalizar dado que diversos puntos no tienen necesariamente un total de 6 vecinos geométricos, existiendo así puntos extremos a los cuales se les asocia una menor cantidad. Particularmente, esta variable puede ser analizada desde el punto de vista de su evolución en el tiempo (véase Figura 32).

Para el Cluster Parrillas se observa la presencia de vecinos con registro de ingreso de dilución en la apertura de los puntos de extracción, los cuales son provenientes del sector aledaño. Conforme aumenta el paso del tiempo, el número de puntos con presencia de dilución también aumenta rápidamente, sobrepasando un promedio de 50% de vecinos diluidos asociados a puntos de extracción activos durante el año 2006.

Por su parte, el Cluster LHD analizado presenta el primer vecino con registro del evento durante el transcurso del mes de enero de 2006, el cual se asocia a un punto diluido de un sector previamente explotado. Luego, el aumento observado es gradual, alcanzando para fines del 2011 un porcentaje promedio cercano al 75% para los puntos de extracción activos. Junto a lo anterior, se observa que a diferencia del Cluster Parrillas, la presencia de un promedio de 50% de vecinos con registro de dilución se alcanza tras 3 años de explotación.

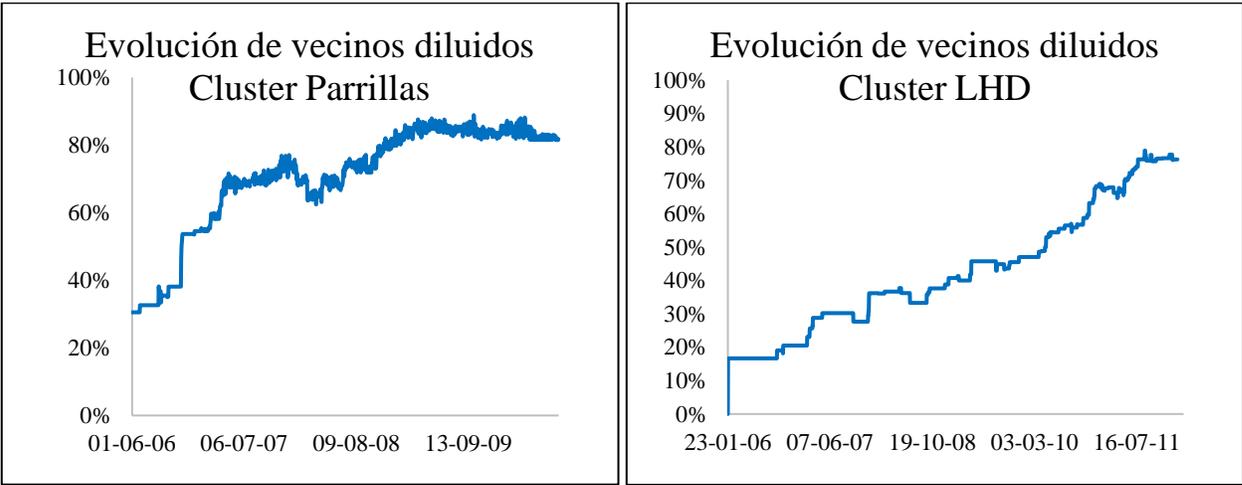


Figura 32. Evolución de vecinos diluidos Parrillas y LHD.

3. Columna extraída

La columna extraída corresponde a la relación entre el tonelaje extraído y la columna in-situ asociada a cada punto de extracción. Particularmente, para el caso de la dilución total en el Cluster Parrillas se observa una distribución de carácter similar a una exponencial, presentándose un ingreso de dilución acumulada al 3% mayoritariamente cuando se tiene entre un 1 % y 50% de columna extraída. Lo anterior indica una entrada de carácter temprano a nivel de cluster, alejándose de lo esperado normalmente para una operación con buenas prácticas tiraje.

Por otro lado, para el caso de la dilución total en el Cluster LHD se observa una distribución de carácter normal, presentándose un ingreso de dilución acumulada al 3% mayoritariamente cuando se tiene entre un 40 % y 70% de columna extraída.

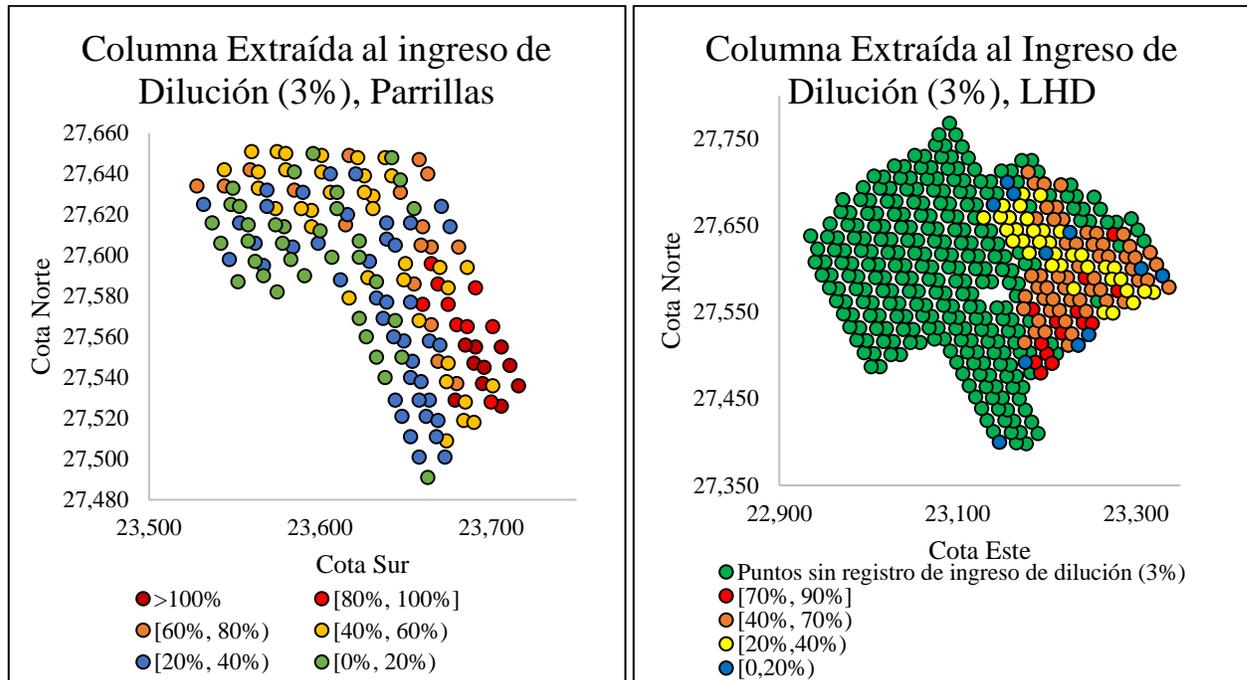


Figura 33. Porcentaje de columna extraída al ingreso de dilución, Parrillas y LHD.

4. Velocidades de extracción

Las velocidades de extracción fueron determinadas a diversas escalas tiempo asociadas a un rango de planificación entre el corto plazo. Conforme a esto, se determinan velocidades bajo las escalas diarias, semanales, 30 días, 90 días y 180 días. Junto a lo anterior, se adiciona el cálculo de las velocidades promedio obtenidas a nivel de vecinos geométricos del punto de extracción para los diversos rangos temporales planteados con anterioridad. Además, se lleva a cabo un cálculo de las velocidades máximas observadas para cada intervalo de tiempo a nivel de punto y vecindad.

Particularmente, para el caso de la velocidad diaria del Cluster Parrillas (véase Figura 34), se observa un comportamiento anómalo o fuera de las practicas operacionales típicas de una operación de caving, teniendo altas velocidades de extracción al inicio de la apertura de los puntos de extracción, y menores velocidades ya en torno al cierre de punto o cuando se alcanzan porcentajes de columna extraídos mayores. Lo anterior indica malas prácticas operacionales y podría atribuirse en cierta medida la entrada temprana de dilución. A modo de ejemplificación y complemento de

planteado, se presentan las velocidades comunes de extracción para una operación de Block/Panel Caving, según porcentaje de columna extraída y área:

- 0-30 [%]: 0.16 [ton/m² día].
- 30-60[%]: 0.25 [ton/m² día].
- 60 o más [%]: 0.70 [ton/m² día].

Bajo esta misma línea, a partir de la Figura 34, se observa para el sector LHD un comportamiento de extracción más cercano al expuesto con anterioridad como buena práctica operacional, donde las velocidades de extracción ante la apertura de puntos van aumentando gradualmente.

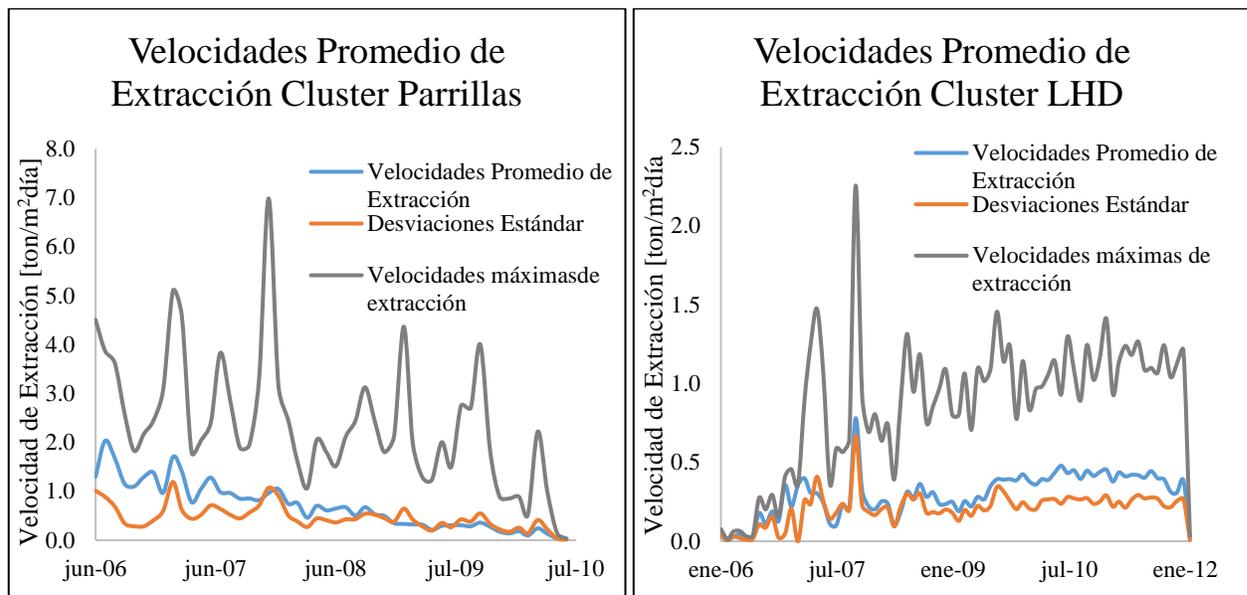


Figura 34. Velocidades promedio de extracción, sectores Parrillas y LHD.

Finalmente, en general se observa que los peaks de velocidad están asociados a extracciones donde se desarrollaron tirajes con velocidades altas y pocos puntos activos, lo cual pondera significativamente en las gráficas expuestas.

5. Índice de uniformidad

El índice de uniformidad es calculado en base a la ecuación planteada por Susaeta (2004) y su matriz adaptada (véase Tabla 35, ANEXO A), clasificando los puntos en uniformes y no uniformes (aislado). Al igual que las velocidades, las uniformidades se determinan a diversas escalas de tiempos y a nivel de vecindad geométrica del punto de extracción. Junto a lo anterior, cabe destacar

que la uniformidad del punto es expresada como el porcentaje del tonelaje que se extrae de forma uniforme con respecto al total extraído.

Particularmente, en la Figura 35 se muestra la uniformidad diaria promedio histórica de los puntos en el Cluster Parrillas, donde se observa que la mayor proporción presenta solo entre un 20 y 40% de tonelaje extraído uniformemente respecto al total, por lo cual, es posible inferir que la mayor parte de la extracción para el sector fue llevada a cabo de forma aislada

Por otro lado, el Cluster LHD presenta una uniformidad histórica promedio mayor a la observada para Parrillas, alcanzando la mayor parte de los puntos valores entre un 60% y 80% de uniformidad de extracción.

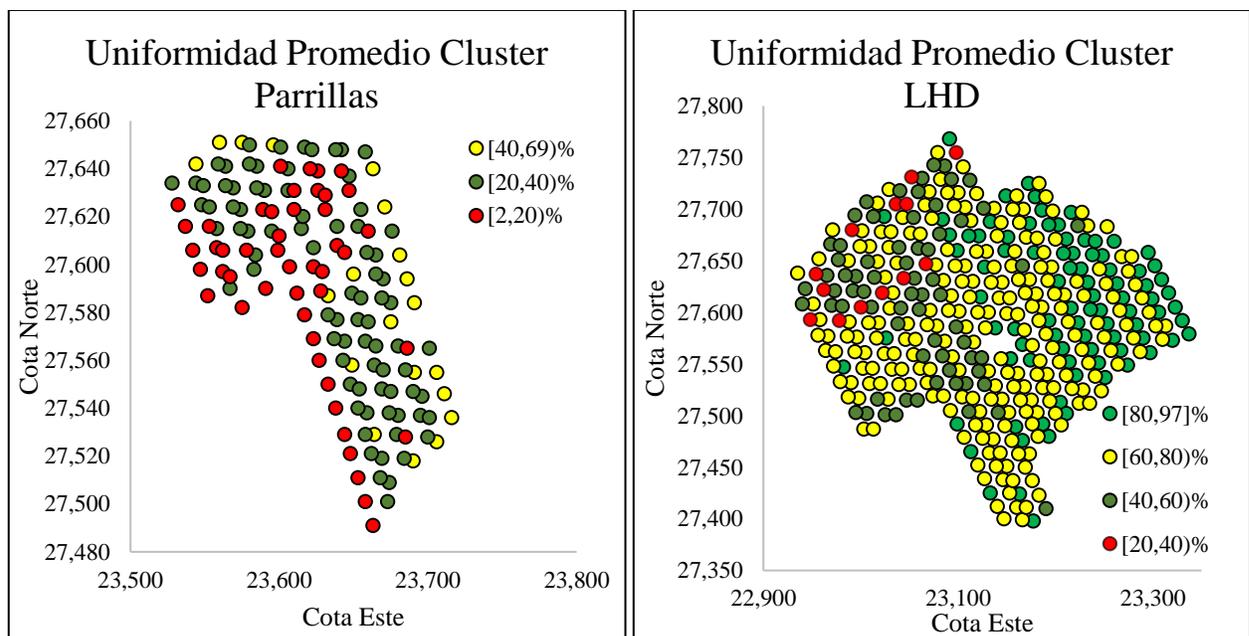


Figura 35. Uniformidad promedio por punto, sectores Parrillas y LHD.

4.3. Conclusiones del capítulo

A partir de lo desarrollado, se infieren hipótesis de la influencia de dos mecanismos de ingreso de dilución en los puntos de extracción. Dichos mecanismos corresponden a una entrada inicial de dilución vertical, la cual luego se extiende lateralmente a sus vecinos conforme aumenta la extracción y apertura de puntos de extracción. En conjunto a lo planteado, se concluye que es posible plantear un mecanismo generalizado o mixto que englobe la interacción vertical y lateral. Lo anterior dada la baja diferencia temporal de entrada de dilución entre puntos activos contiguos, además de la presencia de un mecanismo vertical global que gobierna la entrada de dilución al Cluster LHD (Paredes, 2012).

Junto a lo planteado, a partir del estudio exploratorio de la variable dependiente para el Cluster Parrillas se observa un comportamiento atípico, lo cual se debe a los altos niveles de dilución temprana, velocidad altas y baja uniformidad. Lo anterior permite determinar que el sector no presentó condiciones de buenas prácticas operacionales o de un tiraje común, por lo cual pierden utilidad los estudios de riesgo al ingreso de dilución asociados, es decir, el sector se descarta para la construcción y evaluación de modelos de riesgo al ingreso de dilución. Además, se concluye que ante condiciones de extracción extremas se genera un impacto negativo en el comportamiento de la dilución. Por su parte, el Cluster LHD presenta ingreso de dilución acumulada al 3% en una menor cantidad de puntos y distribuidos con un comportamiento más normal al observado en el Cluster Parrillas. Además, se observan prácticas de tirajes común, por lo cual a partir del presente sector se llevará cabo la construcción de modelos y sus correspondientes evaluaciones.

El próximo capítulo explica la construcción de la base de datos para crear el modelo generalizado e interactivo de mecanismos vertical y lateral. Además, se presentan los modelos obtenidos y sus correspondientes evaluaciones. Las variables estudiadas en el siguiente capítulo corresponden a las expuesta a continuación (véase con más detalle en la Tabla 36, ANEXO A):

Tabla 18. Variables a analizar en la construcción de modelos.

Variable	Tipo	Variable	Tipo	Variable	Tipo	Variable	Tipo	Variable	Tipo
Altura de Columna Total [m]	Ent.	I.U Cluster y Punto [%]	Op.	Alt. de Columna. Secundario [m]	Ent.	Vel. Ext. Cluster [ton/m ² *día]	Op.	Vel. de Ext. Punto [ton/m ² *día]	Op.
Altura de Columna. Primario [m]	Ent.	% Columna Extraída [%]	Op.	Vecinos con dilución [%]	Ent.	Vel. Máx. Ext. Punto [ton/m ² *día]	Op	Vel. Máx. Ext. Cluster [ton/m ² *día]	Op.

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MULTIVARIABLES

5.1. Introducción

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos ante la construcción de modelos multivariantes de riesgo al ingreso de dilución y sus correspondientes evaluaciones. En específico, se detalla la construcción de la base de datos para eventos raros, obtención de modelos, calibración teórica y mediante simulación, además de los análisis asociados y correspondiente validación.

Conforme a la metodología expuesta, la construcción de la base de datos se desarrolla mediante el uso de eventos raros para cada uno de los modelos, generalizado e interactivo de mecanismo vertical y lateral.

Particularmente, la construcción de modelos se desarrolla conforme a lo presentado en el Capítulo 3, amparándose para la selección de variables independientes en el uso de métodos estadísticos y lógica ante el conocimiento del fenómeno de ingreso de dilución.

Luego, se lleva a cabo una calibración teórica a partir del uso de la base datos, además de una calibración mediante simulación de resultados en base a un objetivo específico. Posteriormente, se realiza la validación de los modelos resultantes y una evaluación de su desempeño para determinar el ingreso de dilución.

Finalmente, se plantea de forma gráfica una aplicación práctica del modelo con los mejores resultados expuestos.

5.2. Preparación de base de datos

La base datos para la construcción de modelos según mecanismo de ingreso de dilución a los puntos de extracción se realiza conforme a la metodología planteada para eventos raros.

En la sección anterior, Tabla 15, se expone el número de puntos con ocurrencia del evento de ingreso de dilución acumulada al 3% y asociada a cada mecanismo de ingreso. Es posible apreciar que el número de eventos para el mecanismo lateral en el sector LHD alcanza a 95 puntos, mientras que el vertical 22, lo cual se explica dado que ante la presencia de dilución de un punto se tiene que todos aquellos puntos que presenten al punto diluido en cuestión dentro de su vecindad geométrica pasan a ser evaluados por el mecanismo de ingreso lateral.

Conforme a lo anterior, se lleva a cabo la reducción de la base de datos inicial (véase Tabla 36 , ANEXO A) por medio del uso de una selección aleatoria, tomando en cuenta todos los eventos positivos ($Y=1$) y estableciendo que esta porción de datos sea un 25% de la base de datos total con la cual se construya el modelo. Así, se construyen 3 bases de datos correspondientes a los mecanismos planteados con anterioridad, adicionando el mecanismo mixto o generalizado, que no establece separación en base a las hipótesis de ingreso planteadas. En consecuencia, se tienen las siguientes proporciones para cada una de las bases de datos de construcción de modelos:

- Base de datos modelo generalizado: 117 datos de eventos ($Y=1$), correspondientes a un 25%. 351 datos de no eventos ($Y=0$), correspondientes al 75%.
- Base de datos modelo aislado: 22 datos de eventos ($Y=1$), correspondientes a un 25%. 66 datos de no eventos ($Y=0$), correspondientes al 75%.
- Base de datos modelo lateral: 95 datos de eventos ($Y=1$), correspondientes a un 25%. 285 datos de no eventos ($Y=0$), correspondientes al 75%.

5.3. Construcción de modelos

Conforme a la metodología planteada, hipótesis de ingreso de dilución y variables a estudiar, se realizan los análisis univariados para los distintos modelos del Cluster LHD.

Tabla 19. Análisis univariable, resumen modelo generalizado.

Variable	Beta	Exp(Beta)	Significancia	Variable	Beta	Exp(Beta)	Significancia
Columna Extraída	5.04	153.80	0.00	V. Máx. Semanal	0.38	1.46	0.03
Altura Primario	-0.02	0.98	0.00	V. Máx. 30 Días	0.38	1.46	0.02
Altura Secundario	0.00	1.00	0.98	V. Máx. 90 Días	0.14	1.15	0.19
Altura Total	-0.01	0.99	0.00	V. Máx. 180 Días	-0.10	0.90	0.41
Estado Vecinos	6.69	807.36	0.00	V. Máx. C. Semanal	0.07	1.08	0.64
U. Semanal	0.70	2.02	0.05	V. Máx. C. 30 Días	-0.01	0.99	0.95
U.30 Días	1.14	3.13	0.01	V. Máx. C. 90 Días	-0.16	0.85	0.10
U. 90 Días	1.71	5.55	0.00	V. Máx. C. 180 Días	-0.28	0.76	0.01
U. 180 Días	2.79	16.25	0.00	V. C. Semanal	1.17	3.23	0.02
U. C. Semanal	1.34	3.82	0.00	V. C.30 Días	1.63	5.10	0.00
U. C. 30 Días	1.66	5.28	0.00	V. C. 90 Días	2.19	8.96	0.00
U. C. 90 Días	2.48	11.95	0.00	V. C. 180 Días	2.83	16.95	0.00
U. C. 180 Días	3.67	39.15	0.00	V. 90 Días	1.22	3.38	0.01
V. Semanal	1.00	2.71	0.00	V. 180 Días	1.36	3.90	0.00
V.30 Días	0.99	2.68	0.01				

Tabla 20. Análisis univariable, resumen modelo vertical.

Variable	Beta	Exp(Beta)	Significancia	Variable	Beta	Exp(Beta)	Significancia
Columna Extraída	4.48	88.51	0.00	V. Máx. Semanal	0.85	2.33	0.03
Altura Primario	-0.02	0.98	0.00	V. Máx. 30 Días	0.76	2.14	0.03
Altura Secundario	0.00	1.00	0.16	V. Máx. 90 Días	0.80	2.24	0.01
Altura Total	-0.01	0.99	0.00	V. Máx. 180 Días	0.38	1.46	0.17
Estado Vecinos	-	-	-	V. Máx. C. Semanal	0.34	1.40	0.20
U. Semanal	-0.55	0.58	0.42	V. Máx. C. 30 Días	0.30	1.35	0.16
U. 30 Días	-1.26	0.28	0.14	V. Máx. C. 90 Días	0.34	1.41	0.11
U. 90 Días	-0.51	0.60	0.59	V. Máx. C. 180 Días	0.11	1.12	0.57
U. 180 Días	0.30	1.35	0.76	V. C. Semanal	1.59	4.89	0.19
U. C. Semanal	0.17	1.19	0.85	V. C. 30 Días	3.24	25.62	0.02
U. C. 30 Días	0.39	1.48	0.70	V. C. 90 Días	3.74	42.10	0.01
U. C. 90 Días	1.32	3.76	0.26	V. C. 180 Días	3.93	50.91	0.01
U. C. 180 Días	1.38	3.97	0.26	V. 90 Días	3.20	24.44	0.00
V. Semanal	2.24	9.43	0.00	V. 180 Días	3.30	27.02	0.01
V. 30 Días	3.28	26.65	0.00				

Tabla 21. Análisis univariable, resumen modelo lateral.

Variable	Beta	Exp(Beta)	Significancia	Variable	Beta	Exp(Beta)	Significancia
Columna Extraída	3.28	26.61	0.00	V. Máx. Semanal	0.36	1.43	0.11
Altura Primario	-0.01	0.99	0.00	V. Máx. 30 Días	0.34	1.41	0.09
Altura Secundario	0.00	1.00	0.57	V. Máx. 90 Días	0.12	1.12	0.53
Altura Total	0.00	1.00	0.23	V. Máx. 180 Días	-0.08	0.92	0.65
Estado Vecinos	5.03	153.17	0.00	V. Máx. C. Semanal	-0.13	0.88	0.62
U. Semanal	0.33	1.39	0.44	V. Máx. C. 30 Días	-0.24	0.79	0.25
U. 30 Días	0.59	1.81	0.29	V. Máx. C. 90 Días	-0.16	0.85	0.32
U. 90 Días	0.50	1.65	0.48	V. Máx. C. 180 Días	-0.19	0.82	0.16
U. 180 Días	1.48	4.40	0.08	V. C. Semanal	0.70	2.01	0.25
U. C. Semanal	0.51	1.67	0.32	V. C. 30 Días	0.45	1.57	0.52
U. C. 30 Días	0.35	1.42	0.58	V. C. 90 Días	0.88	2.41	0.29
U. C. 90 Días	0.47	1.60	0.54	V. C. 180 Días	2.03	7.63	0.03
U. C. 180 Días	1.64	5.18	0.06	V. 90 Días	0.93	2.54	0.16
V. Semanal	0.99	2.69	0.01	V. 180 Días	1.78	5.92	0.02
V. 30 Días	0.64	1.90	0.22				

A partir de las tablas anteriormente expuestas, y conforme a los criterios establecidos en la metodología, es posible observar una clara tendencia de significancia para el modelo por parte de

las variables Estado de Vecinos, Columna Extraída, Altura de Columna y algunos rangos de velocidades y uniformidades; donde para éstas últimas se observan coeficientes beta que no siguen la naturaleza esperada para la variable (véase Tabla 8), presentándose coeficientes con signo positivos para la uniformidad, y negativos para la velocidad en ciertos rangos. Lo anterior se asocia a la escala a cual es evaluada el punto, el filtro de datos según el modelo y las practicas operaciones. Finalmente, los análisis complementarios a los univariables de las variables independientes evaluadas para cada modelo se presentan en el ANEXO B.

5.3.1. Modelo Generalizado, Cluster LHD

A partir de los resultados obtenidos tras el análisis univariable se aplica iterativamente la metodología propuesta en el Capítulo 3, evaluando la interacción de variables, significancia y sentido de ellas para la construcción de modelos.

El modelo generalizado resultante para el Cluster LHD presenta como variables significantes el estado de los vecinos del punto de extracción a evaluar, la altura de mineral primario, el porcentaje de columna extraída y el porcentaje de tonelaje extraído de forma uniforme que presenta el punto y sus vecinos geométricos durante los últimos 30 días.

Junto a lo anterior, se observa que finalmente no todas las variables significantes en el análisis univariable fueron seleccionadas en el multivariable, como ocurre con algunos rangos de velocidades. Lo anterior a causa de la interacción y peso en el modelo que presentan algunas variables que también son propicias a aumentar la probabilidad de ingreso de dilución junto a la velocidad, como lo es el estado de los vecinos y el porcentaje de columna extraída. En consecuencia, se genera una interacción negativa en el sentido de cambio de naturaleza de la variable velocidad y su significancia en el modelo.

A continuación, en la ecuación 5.1, se expone el modelo generalizado resultante.

$$P_G(x) = \frac{e^{-1.401+4.990*Ev+2.985*CE-0.011*AP-1.294*UC30d}}{1+e^{-1.401+4.990*Ev+2.985*CE-0.011*AP-1.294*UC30d}} \quad (5.1)$$

La Tabla 22 resume las variables obtenidas para el modelo propuesto tras el análisis multivariable. Cabe destacar que todas las variables son significantes estadísticamente, siendo la variable Estado de Vecinos aquella que presenta más peso en el modelo. Conforme a lo anterior, es importante señalar que cada una de las variables expone correspondencia al sentido físico que se le asocia. Así, a modo de ejemplo, ante un aumento de uniformidad la probabilidad de ocurrencia del evento

disminuye. Consecuentemente, dicha relación también se da para la Altura de Primario. Por su parte, ocurre lo contrario para las variables Estado de Vecinos y Columna Extraída, obteniendo que ante el aumento de estas se tendrá también un aumento de la probabilidad de ocurrencia del evento.

Tabla 22. Variables modelo generalizado.

Tipo de Variable	Variable	Beta	Significancia	Exp(B)	Intervalo de Confianza (95%)	
					Inferior	Superior
Entorno	Estado Vecinos (Ev) [%]	4.99	0.000	146.967	37.627	574.04
Operacional	Columna Ext. (CE) [%]	2.985	0.000	19.786	4.454	87.897
Entorno	Altura Primario (AP) [m]	-0.011	0.001	0.989	0.982	0.995
Operacional	U. Cluster 30 d (UC30d) [%]	-1.294	0.066	0.274	0.069	1.089

5.3.2. Modelo de Mecanismo Vertical, Cluster LHD

Al igual que para el modelo generalizado, a partir de los resultados obtenidos tras el análisis univariable se aplica iterativamente la metodología propuesta en el Capítulo 3.

El modelo de ingreso vertical obtenido para el Cluster LHD presenta como variables significantes la altura de columna de material primario, el porcentaje de columna extraída y la uniformidad de extracción de los últimos 30 días del punto. Lo anterior se expone en la ecuación 5.2:

$$P_V(x) = \frac{e^{1.884-0.017*AP-5.106*CE-3.530*U30d}}{1+e^{1.884-0.017*AP-5.106*CE-3.530*U30d}} \quad (5.2)$$

La Tabla 23 resume las variables obtenidas para el modelo propuesto. Cabe destacar que, al igual que para el modelo generalizado, todas las variables son significantes. Además, de forma particular para este modelo la variable Estado de Vecinos no es considerada para su construcción. Junto a esto, se observa que la variable Columna Extraída es aquella con mayor peso en el modelo. Bajo la misma línea, se observa que, a diferencia del modelo generalizado, el presente modelo presenta a la variable uniformidad del punto a 30 días como significativa. Lo anterior se asocia al sentido del modelo y la base de datos con la cual fue construido, los cuales apuntan a un ingreso de dilución inicial por un mecanismo vertical, donde el comportamiento que presenta el punto es más significativo que su interacción con los vecinos. Lo señalado también se refleja en el análisis univariable realizado (véase Tabla 20).

Tabla 23. Variables modelo vertical.

Tipo de Variable	Variable	Beta	Significancia	Exp(B)	Intervalo de Confianza (95%)	
					Inferior	Superior
Entorno	Altura Primario (AP) [m]	-0.017	0.002	0.983	0.972	0.993
Operacional	Columna Ext. (CE) [%]	5.106	0.006	165.075	4.449	6125.217
Operacional	U. 30 d (U30d) [%]	-3.53	0.004	0.029	0.003	0.333

5.3.3. Modelo de Mecanismo Lateral, Cluster LHD

El modelo lateral, al igual que el modelo generalizado, presenta como variables significantes el estado de los vecinos del punto de extracción a evaluar y el porcentaje de columna extraída. A continuación, en la ecuación 5.3, se expone el modelo resultante.

$$P_L(x) = \frac{e^{-3.398+3.615*Ev+2.346*CE}}{1+e^{-3.398+3.615*Ev+2.346*CE}} \quad (5.3)$$

La Tabla 24 resume las variables obtenidas para el modelo propuesto. Cabe destacar que la variable estado de vecinos nuevamente corresponde a aquella que presenta el mayor peso en el modelo.

Tabla 24. Variables modelo lateral.

Tipo de Variable	Variable	Beta	Significancia	Exp(B)	Intervalo de Confianza (95%)	
					Inferior	Superior
Entorno	Estado Vecinos (Ev) [%]	3.615	0.000	37.133	11.117	124.029
Operacional	Columna Ext. (CE) [%]	2.346	0.001	10.445	2.715	40.185

A partir de las variables resultantes para el presente modelo, es importante destacar que ambas muestran una relación positiva con la variable dependiente, es decir, en medida que éstas aumentan se tiene que la probabilidad de ingreso de dilución acumulada al 3% también lo hace. A partir de lo anterior, ante un ingreso mediante el mecanismo vertical se tendrá una posterior entrada inminente de dilución futura para los puntos de extracción vecinos mediante el mecanismo lateral, cuya probabilidad aumenta conforme avanza la extracción o si aparecen nuevos vecinos geométricos con ocurrencia del evento.

Un análisis adicional a las variables de los modelos planteados puede llevarse a cabo mediante el uso de las Odds Ratio, las cuales son obtenidas a partir de los coeficientes de regresión (Beta) de las variables independientes introducidas en los modelos. Las Odds Ratio corresponden al riesgo de tener el resultado o efecto evaluado para un determinado valor (x) respecto al valor disminuido en una unidad (x-1). Lo anterior permite generar una noción de la influencia de la variable ante la constancia del resto. Así, a continuación, se plantean ejemplos para cada una de las variables presentes en los modelos:

Tabla 25. Odds Ratio para variables de los modelos.

Modelo	Variable	β	$x_1 - x_2$	$e(\beta(x_1 - x_2))$	Comentario
Generalizado	Estado Vecinos (Ev) [%]	4.990	1%	1.05	Implica un aumento de 1.05 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
	Columna Extraída (CE) [%]	2.985	1%	1.03	Implica un aumento de 1.03 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
	Altura Primario (AP) [m]	-0.011	1[m]	0.99	Implica una disminución de 0.99 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
	U. Cluster 30 d (UC30d) [%]	-1.294	1%	0.99	Implica una disminución de 0.99 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
Vertical	Altura Primario (AP) [m]	-0.017	1 [m]	0.98	Implica una disminución de 0.98 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
	Columna Extraída (CE) [%]	5.106	1%	1.05	Implica un aumento de 1.05 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
	U. 30 d (U30d) [%]	-3.530	1%	0.97	Implica una disminución de 0.97 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
Lateral	Estado Vecinos (Ev) [%]	3.615	1%	1.03	Implica un aumento de 1.03 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).
	Columna Extraída (CE) [%]	2.346	1%	1.02	Implica un aumento de 1.02 veces la probabilidad de ingreso de dilución (3%).

Finalmente, en síntesis de los modelos resultantes se expone la siguiente tabla resumen.

Tabla 26. Resumen de Modelos.

Modelo	Variable	Ecuación
Generalizado	Estado Vecinos (Ev) [%] Altura Primario (AP) [m] Columna Extraída (CE) [%] U. Cluster 30 d (UC30d) [%]	$\frac{e^{-1.401+4.990*Ev+2.985*CE-0.011*AP-1.294*UC30d}}{1+e^{-1.401+4.990*Ev+2.985*CE-0.011*AP-1.294*UC30d}}$
Interactivo Vertical	Altura Primario (AP) [m] Columna Extraída (CE) [%] U.30 d (U30d) [%]	$\frac{e^{1.884-0.017*AP-5.106*CE-3.530*U30d}}{1+e^{1.884-0.017*AP-5.106*CE-3.530*U30d}}$
Interactivo Lateral	Estado Vecinos (Ev) [%] Columna Extraída (CE) [%]	$\frac{e^{-3.398+3.615*Ev+2.346*CE}}{1+e^{-3.398+3.615*Ev+2.346*CE}}$

A partir de los modelos resultantes, se observa que las variables seleccionadas para el Modelo Interactivo, concordante a los mecanismos expuestos por Paredes (2012), son comunes a las seleccionadas para el Modelo Generalizado. Conforme a lo anterior, el Modelo Generalizado, que engloba los mecanismos verticales y laterales, contempla el mismo sentido y naturaleza de las variables del Modelo Interactivo, pero con diferentes ponderaciones en ellas y mayor simplicidad.

5.4. Calibración de modelos

La calibración teórica de los modelos es llevada a cabo mediante la determinación de la probabilidad de corte que se obtiene ante la intersección de las curvas de sensibilidad y especificidad de los modelos evaluados ante la misma base de datos para eventos raro con la cual fueron obtenidos. Dado lo anterior, es importante precisar los siguientes conceptos:

- **Sensibilidad:** Probabilidad de predecir el evento (Y=1) dado que ocurre, es decir, caracteriza la capacidad de la prueba de detectar la ocurrencia del evento. Para el caso evaluado, la sensibilidad mide la capacidad de detectar dilución (3%) en un punto realmente diluido.
- **Especificidad:** Probabilidad de predecir la no ocurrencia del evento (Y=0) dado que no ocurre, es decir, indica la capacidad del estimador para dar como casos negativos los casos donde realmente no ocurre el evento. Para el caso evaluado particularmente en el presente trabajo de memoria, la especificidad mide la capacidad para descartar la dilución acumulada (3%) en un punto cuando este no se diluye realmente.

5.4.1. Modelo Generalizado, Cluster LHD

En la Figura 36 se muestran las curvas de especificidad y sensibilidad para el modelo generalizado, cuya intersección muestra una exactitud en torno al 80% bajo una probabilidad de corte de 20%.

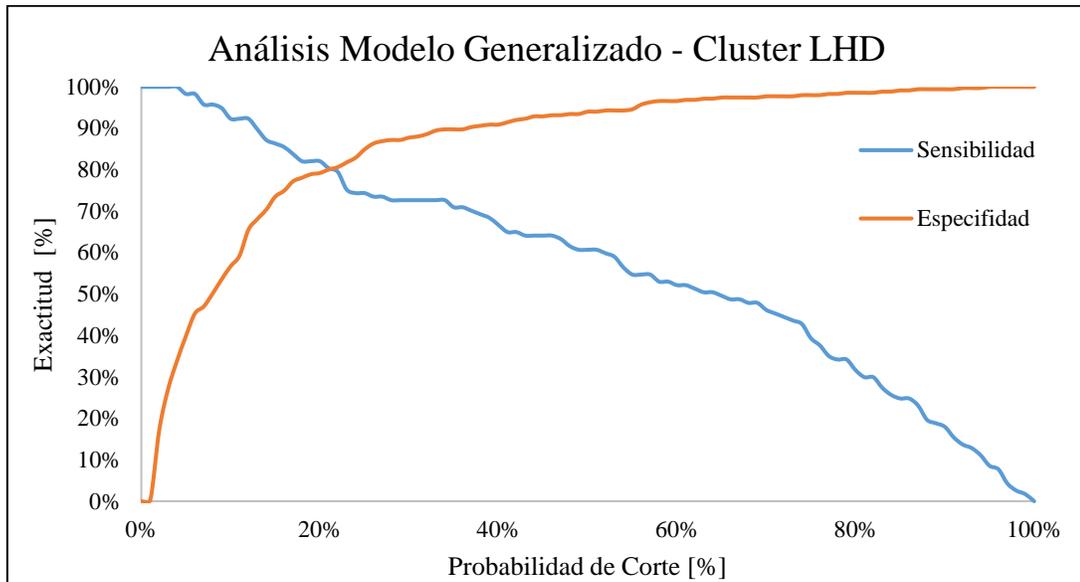


Figura 36. Calibración teórica modelo generalizado, LHD.

Tabla 27 . Calibración teórica modelo generalizado, IHD.

Punto de Corte Modelo Generalizado			
Probabilidad de Corte	Sensibilidad	Especificidad	Exactitud
20%	82%	79%	80%

Junto a la calibración teórica, es posible desarrollar una calibración bajo otro enfoque. Particularmente, es posible evaluar un conjunto de probabilidades de corte bajo diversos enfoques desarrollando simulaciones sin variabilidad, pero actualizando la variable Estado de Vecinos en medida que el modelo indica la ocurrencia de eventos. A continuación, en la Tabla 28 se muestran los resultados finales tras una calibración desarrollada en torno a la obtención de una alta capacidad predictiva del evento y la minimización de errores asociados a tonelajes subestimados o sobrestimados ante la ocurrencia de evento modelado. Cabe destacar que la evaluación se lleva a cabo en torno a la base completa de datos. Los detalles de la evaluación de otras probabilidades de corte se encuentran en la sección ANEXO C.

Tabla 28. Calibraciones modelo generalizado.

Modelo Generalizado						
Probabilidad de Corte [%]	Puntos con eventos estimados correctamente	No eventos estimados correctamente	Eventos sobrestimados	Eventos subestimados	Exactitud del modelo [%]	Confiabilidad del modelo [%]
20	117	86	194	0	51	65
55	115	226	54	2	86	90

Al observar la probabilidad teórica versus la calibrada en torno a la base de datos completa, se destaca una mayor exactitud y confiabilidad de estimación por parte del modelo a partir de la última. Junto a lo planteado, se expone la Figura 37 a partir de la cual se observa un error mayormente distribuido en torno a 0 y 20 kton, por lo cual se infiere que la predicción del modelo es aceptable. Además, la dispersión de tonelajes acumulados presenta pocos eventos extremos en sobrestimación, los cuales en su mayoría corresponden a puntos borde, es decir, puntos con vecinos fuera del sector analizado.

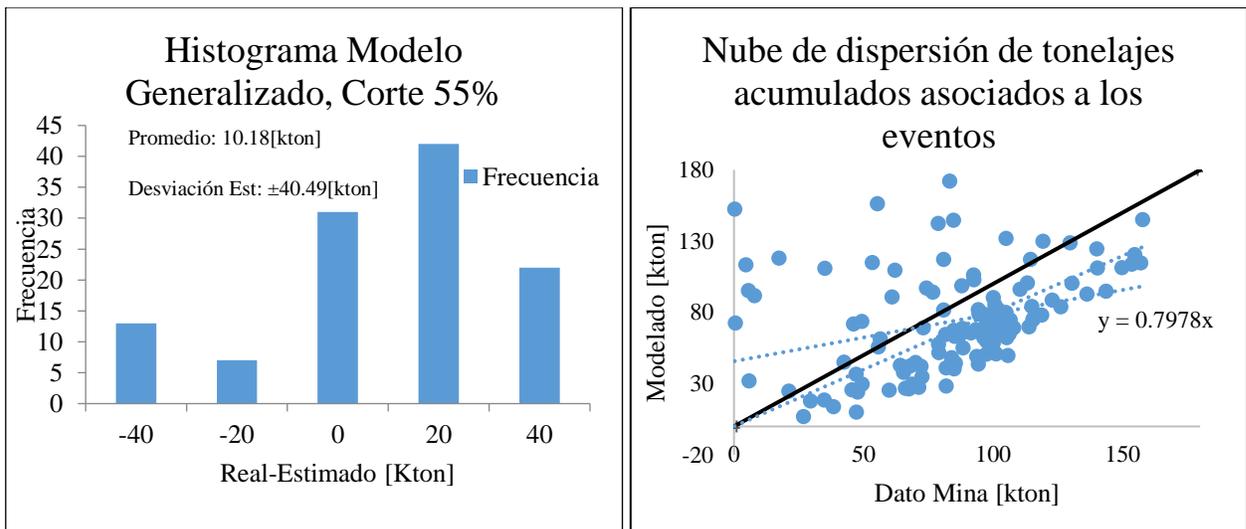


Figura 37. Errores y nube de dispersión del modelo generalizado, Cluster LHD.

5.4.2. Modelo Interactivo, Cluster LHD

En la Figura 38 se muestran las curvas de especificidad y sensibilidad para los modelos vertical y lateral, cuya intersección muestra una exactitud en torno al 83% bajo una probabilidad de corte de 28% para el caso del modelo vertical, mientras que para el lateral se observa una probabilidad de corte de un 26% con presencia de un 77% de exactitud.

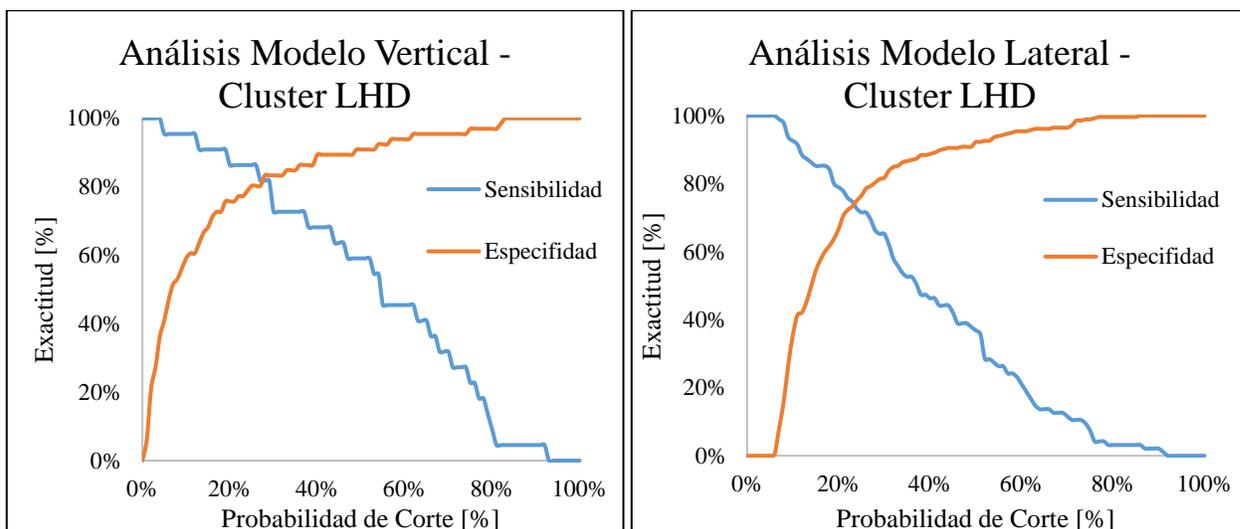


Figura 38. Calibración teórica vertical y lateral, LHD.

Tabla 29. Calibración teórica modelo generalizado, LHD.

Punto de Corte Modelo Interactivo				
Modelo	Probabilidad de Corte	Sensibilidad	Especificidad	Exactitud
Vertical	28%	82%	83%	83%
Lateral	26%	72%	79%	77%

De igual forma que para el modelo generalizado, se lleva a cabo una calibración a partir de simulaciones. La comparación de las evaluaciones resultantes para el caso del corte teórico y el obtenido en base a los criterios planteados se expone a continuación:

Tabla 30. Calibraciones modelo interactivo.

Modelo Interactivo						
Probabilidad de Corte [%]	Puntos con eventos estimados correctamente	No eventos estimados correctamente	Eventos sobrestimados	Eventos subestimados	Exactitud del modelo [%]	Confiabilidad del modelo [%]
V(26) y L(28)	94	204	76	23	75	77
50	99	224	56	18	81	82

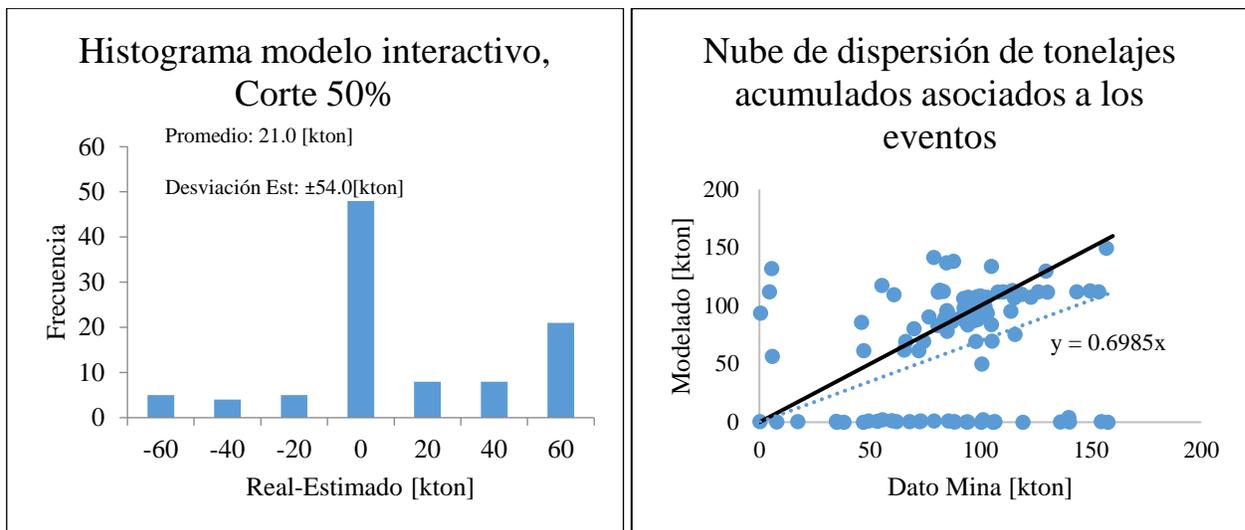


Figura 39. Errores y nube de dispersión del modelo interactivo, Cluster LHD.

Se observa que la probabilidad de corte calibrada en torno a la base de datos completa bajo el criterio propuesto presenta una mayor exactitud y confiabilidad de estimación que la teórica. Junto a lo planteado, se expone la Figura 39, de la cual se observa un error distribuido mayoritariamente en torno a 0, por lo cual se infiere que la predicción del modelo es aceptable. No obstante, tanto el error promedio como su desviación estándar es mayor a la observada para el modelo generalizado. Además, la dispersión de tonelajes acumulados presenta más eventos extremos en sobrestimación y subestimación, los cuales en su mayoría corresponden a puntos borde y al déficit de capacidad predictiva del modelo vertical ante bajos valores de uniformidad.

5.5. Validación de modelos

La validación de los modelos es llevada cabo mediante el uso de matrices de contingencia e indicadores de desempeño y errores para el modelo multivariable aplicado a la base total de datos. Cabe destacar que es posible establecer una comparación entre los resultados obtenidos ante modelos calibrados teóricamente y aquellos con calibración en base a minimizar los tonelajes extraídos con error en la predicción del evento.

5.5.1. Modelo Generalizado, Cluster LHD

En conjunto a los indicadores expuestos en la Tabla 28, se muestra una comparación del modelo evaluado bajo ambas probabilidades de corte versus los datos reales. Particularmente, cabe destacar la alta similitud de los resultados del modelo bajo un corte de 55% con los datos mina.

Tabla 31. Ingreso de dilución modelo generalizado y datos mina, LHD.

Parámetros	Modelo (Corte teórico 20%)	Modelo (Corte 55%)	Dato Mina
Número de puntos con Dilución (3%)	117	115	117
Promedio Tonelaje Acumulado al Evento [kton]	4.7	73.7	82.9
Desviación Estándar [kton]	8.6	35.0	35.7
Entrada promedio de dilución [meses]	2.1	25.7	28.2

Otro punto de comparación nace a partir de los trabajos llevados a cabo por Armijo (2013), donde el autor realiza una evaluación para el mismo sector, no obstante, una menor cantidad de puntos y directamente para solo un elemento diluyente correspondiente a material quebrado. La evaluación consiste en simulaciones desarrolladas en Rebop, las cuales arrojan errores mayores en términos de número de puntos correctamente estimados con ingreso de dilución acumulada al 3%, promedio y desviación de tonelajes acumulados, además del número de meses a la entrada promedio de dilución (3%) (véase Tabla 32).

Tabla 32. Comparación modelo generalizado y simulaciones Rebop.

Parámetros	Error Simulaciones Rebop [%]	Error Modelo [%]
Puntos con evento	11%	2%
Promedio [kton]	-20%	11%
Desv. Estándar [kton]	61%	2%
Entrada promedio [meses]	-22%	9%

5.5.2. Modelo Interactivo Cluster LHD

En conjunto a los indicadores expuestos para el modelo interactivo en la Tabla 30, se muestra una comparación del modelo evaluado bajo ambas probabilidades de corte versus los datos reales. Particularmente, cabe destacar una menor similitud de resultados del presente modelo con los datos mina respecto a los obtenidos por el modelo generalizado.

Tabla 33. Ingreso de dilución modelo interactivo y datos mina, LHD.

Parámetros	Modelo (teórico)	Modelo (Corte 50%)	Dato Mina
Número de puntos con Dilución (3%)	94	99	117
Promedio Tonelaje Acumulado al Evento [kton]	44.4	67.0	82.9
Desviación Estándar [kton]	41.1	49.2	35.7
Entrada promedio de dilución [meses]	15.5	21.8	28.2

De igual forma que al modelo generalizado, se establece una comparación porcentual de los resultados obtenidos a partir del modelo interactivo versus las simulaciones desarrolladas por Armijo (2013).

Tabla 34. Comparación modelo interactivo y simulaciones Rebop.

Parámetros	Error Simulaciones Rebop [%]	Error Modelo [%]
Puntos con evento	11%	15%
Promedio [kton]	-20%	19%
Desv. Estándar [kton]	61%	-38%
Entrada promedio [meses]	-22%	23%

Conforme a lo expuesto en la tabla anterior, se observan errores de magnitudes similares, desprendiéndose comparativamente que el comportamiento del modelo generalizado se asemeja más a los datos reales que los dos casos planteados en la Tabla 34.

Finalmente, a modo de complemento de lo anteriormente expuesto, se muestra una comparación de los tonelajes extraídos a los cuales se registró dilución acumulada al 3% según el dato real y lo estimado por los modelos obtenidos.

En la Figura 40 se expone la vista en planta de los tonelajes acumulados extraídos por los puntos al momento de ocurrencia del evento real. De la figura es posible inferir que la mayor proporción de los puntos que registraron dilución corresponden a aquellos que llevan o presentan una extracción acumulada en torno a las 50 y 100 kton.

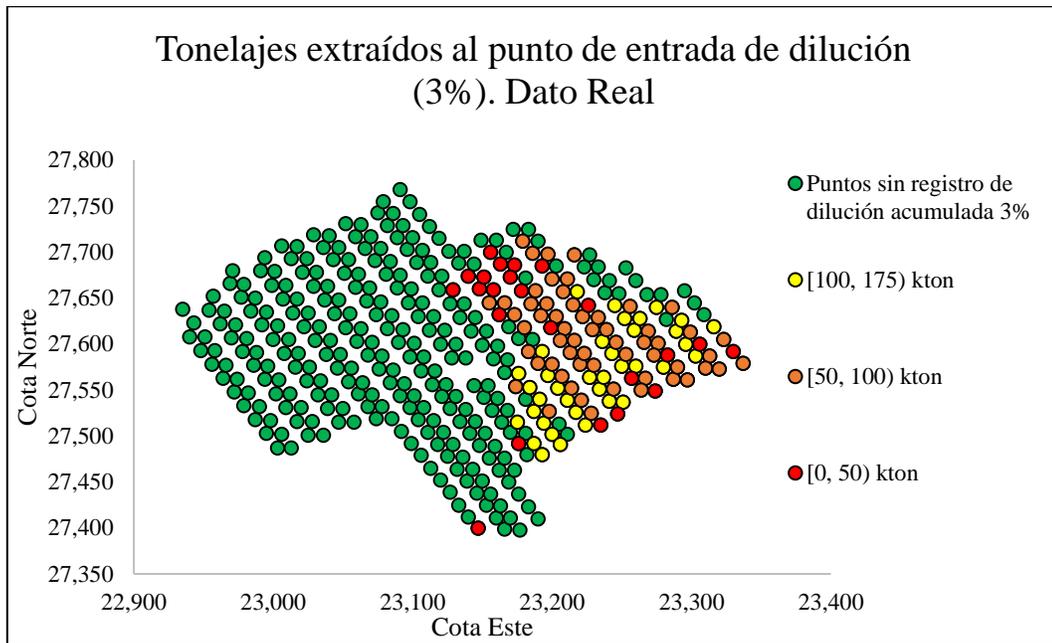


Figura 40. Tonelajes extraídos al punto de entrada de dilución acumulada (3%), dato real LHD.

En la Figura 41 se exponen los tonelajes acumulados al punto de entrada de dilución (3%) para los modelos generalizado e interactivo. Además, se expresa la vista en planta con errores en [kton] asociados a la diferencia del dato real con la estimación de ocurrencia del evento.

Considerando el modelo generalizado, se observa que la simulación realizada genera un halo de puntos sobrestimados alrededor de aquellos con evento estimados correctamente. Lo anterior se asocia al alto peso de la variable estado de vecinos diluidos. Además, se observa una distribución de puntos similar a la presentada por los datos reales.

Para el caso de la interacción entre el modelo aislado y lateral igualmente se observa la formación de un halo de puntos sobrestimados en torno a los puntos diluidos, esto dado el alto impacto que genera la variable estado de vecinos en el modelo lateral. Junto a lo planteado, también se observan puntos dispersos con aparición de dilución, los cuales se atribuyen a la baja especificidad del modelo vertical ante bajas uniformidades.

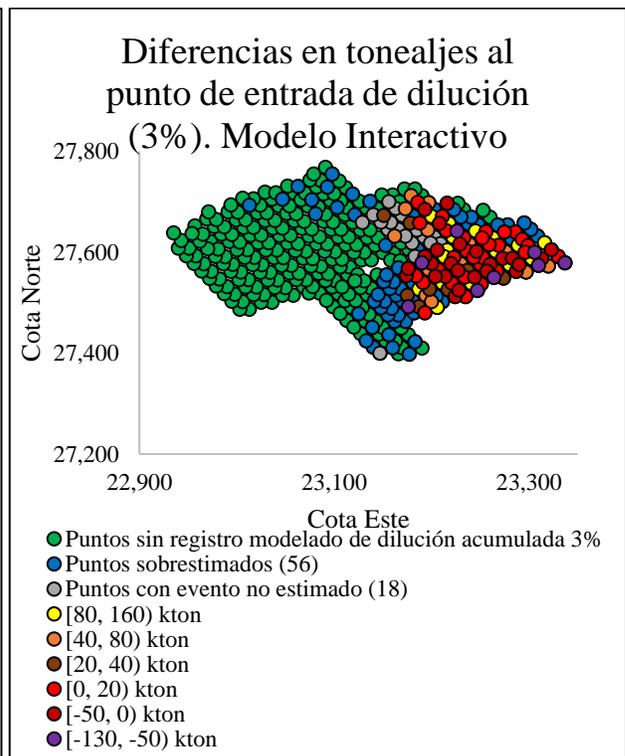
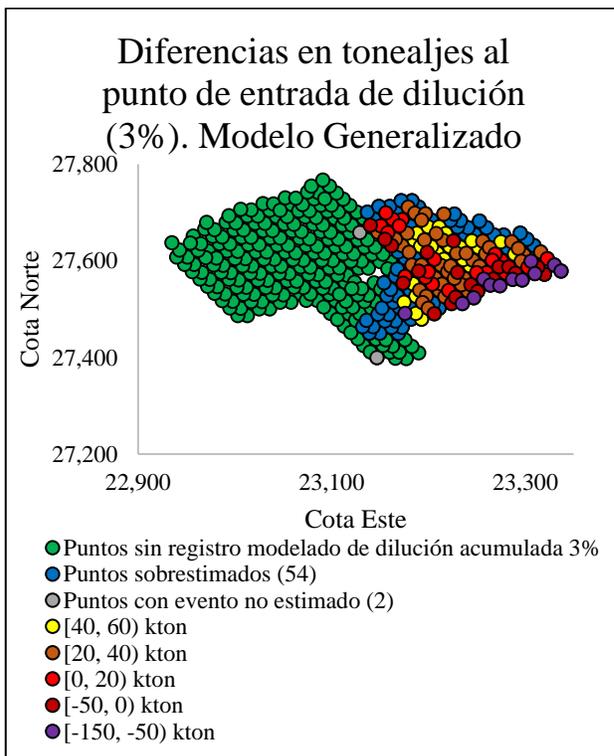
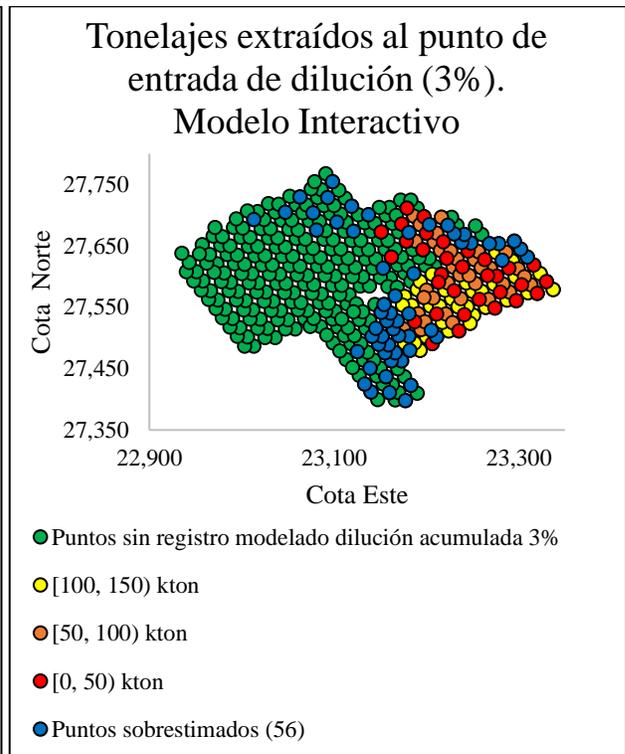
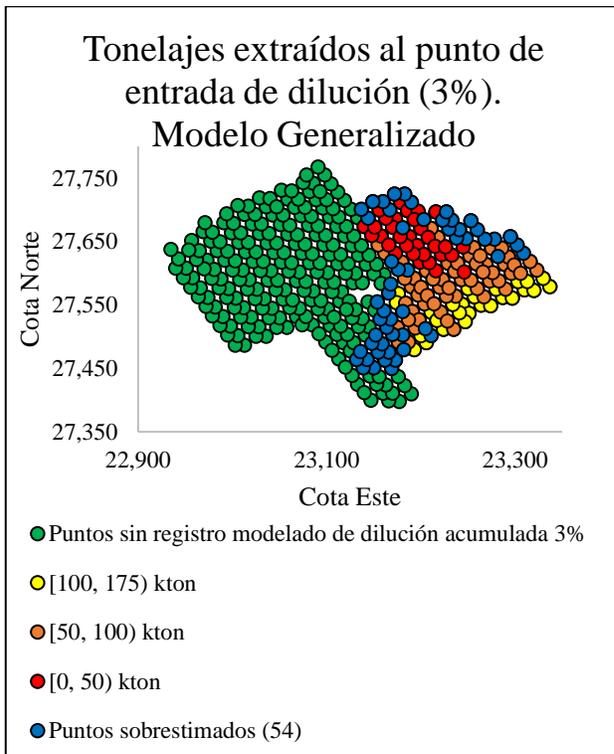


Figura 41. Tonelajes extraídos y diferencias al punto de entrada de dilución acumulada (3%), modelos LHD.

Junto a los resultados expuestos, cabe destacar que el modelo generalizado ante simulaciones entrega un error promedio de 2.7 meses en la determinación del punto de ingreso de dilución

acumulada al 3%. Lo anterior con una confiabilidad de un 90%. Por otro lado, el modelo interactivo presenta un error mayor, el cual está en torno a los 7.6 meses, y con una confiabilidad de un 82%. Finalmente, conforme a los resultados obtenidos, se infiere un mejor desempeño presentado por parte del modelo generalizado. A partir de éste y su corte determinado en base a simulaciones (55%), es posible establecer una aplicación gráfica mediante el uso de la transformada logit y la definición previa de los siguientes parámetros:

- Número de Entorno: valor dado por las variables de entorno presentes en el modelo según la ecuación 5.4:

$$\text{Número de Entorno} = 3.000 + 4.990 * Ev[\%] - 0.011 * AP[m] \quad (5.4)$$

- Número Operacional: valor dado por las variables operacionales presentes en el modelo según la ecuación 5.5:

$$\text{Número Operacional} = 1.500 + 2.985 * CE[\%] - 1.294 * UC30d[\%] \quad (5.5)$$

Conforme a los números definidos previamente, es posible plantear la siguiente gráfica, cuya función recae en una representación simplificada y práctica del modelo generalizado, definida en base a parámetros operacionales y de entorno, siendo capaz de clasificar en base a ellos el riesgo de ingreso de dilución acumulada al 3% para un punto de extracción.

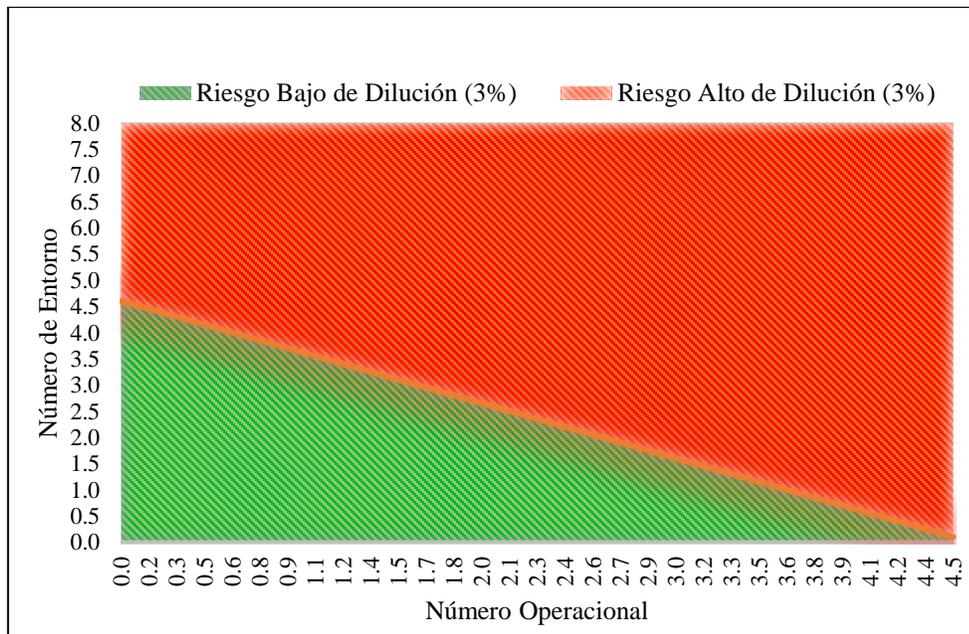


Figura 42. Gráfica de riesgo de dilución acumulada al 3%.

5.6. Conclusiones del capítulo

Se concluye que un modelamiento exitoso conlleva partes científicas, métodos estadísticos, además de la experiencia y sentido común de quien construye los modelos. Así, es importante llevar a cabo un detallado análisis de las variables influyentes y su posible influencia en el fenómeno de estudio.

Conforme a lo anterior, se destaca que variables de tipo operacional a escala de 30 días corresponden a aquellas que estadísticamente generaron modelos con mejores capacidades predictivas, lo cual es congruente con el enfoque del modelo, el cual busca determinar el riesgo a una escala operacional. Además, se destaca la presencia y peso de las variables asociadas al estado de los vecinos del punto evaluado y porcentaje de columna extraída.

Dependiendo del objetivo, se pueden llevar a cabo diferentes metodologías para determinar el punto de corte de los modelos. Particularmente, si solo se desea clasificar el punto ante la ocurrencia o no de entrada de dilución, se puede escoger un corte óptimo que maximice tanto especificidad como sensibilidad. No obstante, la metodología anterior no es discriminante, siendo así sub-óptima ante un enfoque orientado hacia la diferenciación de ocurrencia o no del evento con el menor error de tiempo y tonelaje posible. En consecuencia, se determina la probabilidad de corte de los modelos en base a simulaciones y bajo el enfoque de minimizar el error asociado a los tonelajes extraídos, logrando así mejores resultados que los obtenidos ante una calibración teórica.

A partir de los modelos obtenidos, se observa que el uso de regresión logística permite la utilización de las Odds Ratio, con las cuales es posible variar unidades de las variables independientes y así lograr determinar con qué parámetros sería posible reducir el riesgo de ingreso de dilución a una escala operacional, consiguiendo así una eventual aplicación industrial para llevar a cabo la evaluación de plantes a corto plazo. Bajo esta misma línea, a partir de la transformada del modelo generalizado, se plantea una gráfica que determina de forma sencilla y esquemática el riesgo de ingreso de dilución para un punto de extracción en base a un número de entorno y otro operacional.

Finalmente, a partir de lo desarrollado, se concluye que el modelo generalizado presenta una mejor capacidad predictiva y simpleza ante su aplicación. Lo anterior, en forma comparativa al modelo interactivo conformado por los mecanismos vertical y lateral, además de resultados asociados a herramientas de simulación como ReboP, según simulaciones desarrolladas Armijo (2013).

En el próximo capítulo se explica las conclusiones generales de esta investigación junto a las recomendaciones y trabajos futuros identificados como oportunidades de mejora.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones generales

La dilución corresponde a un elemento integral para una operación de caving. No obstante, a pesar de que su ingreso temprano trae consigo importantes implicancias a lo largo de la vida de un proyecto minero de caving, uno de sus principales desafíos; el cual consiste en integrar su estimación con el objetivo de disminuir su incertidumbre en el negocio minero; no se ha abarcado a totalidad. A partir de lo anterior, se concluye que resulta necesario desarrollar modelos para determinar el ingreso de dilución, incorporando las principales variables que gobiernan el fenómeno.

A partir del análisis exploratorio de datos, se concluye lo siguiente:

- El estudio exploratorio de las variables para el Cluster Parrillas arroja un comportamiento atípico, lo cual se debe a los altos niveles de dilución temprana, velocidades altas y baja uniformidad. Lo anterior permite determinar que el sector no presentó las condiciones de un tiraje común. Consecuentemente, cabe señalar que ante condiciones de extracción extremas se genera un impacto de carácter negativo en el comportamiento de la dilución.
- Se concluye que cuando un panel se encuentra debajo de un sector previamente explotado o con elementos diluyentes, el desarrollo de un conjunto de buenas de tiraje permite que la entrada de la dilución a nivel de puntos de extracción sea en general tardía. Lo anterior fue observado para el sector LHD, el cual puede ser contrastado con el sector Parrillas.
- El análisis de la hipótesis de mecanismos de entrada dilución propuesto indica que los procesos que dan origen a la entrada de dilución son similares a los expuestos ante el ingreso de barro. A partir de lo anterior, se concluye que en una operación de Panel Caving se tiene un primer ingreso vertical de dilución a los puntos de extracción y luego su propagación lateral hacia los vecinos geométricos asociados al punto diluido. Sin embargo, a partir de los mecanismos anteriores, es posible plantear un mecanismo generalizado o mixto que los englobe dada la baja diferencia temporal de entrada de dilución entre puntos activos contiguos, además de la presencia de un mecanismo vertical que gobierna el sector.

Bajo una óptica general, los modelos de dilución propuestos a partir del presente trabajo de memoria presentan una confiabilidad buena para la base de datos a partir de la cual fueron evaluados. Consecuentemente, estos pueden ser potencialmente empleados para planificar e incluso realizar evaluaciones en el corto plazo, entregando así una herramienta para mitigar el error asociado a las estimaciones de dilución.

En consecuencia a lo planteado, el trabajo desarrollado permite dejar una noción respecto a que la regresión logística puede ser una herramienta empleada para determinar el riesgo a la entrada dilución siendo calibrada correctamente a partir de una base de datos. Bajo la misma directriz, la regresión logística permite identificar de forma estadística las variables principales que son capaces de influir en el fenómeno y que deben ser tomadas en cuenta ante la construcción de modelos de esta naturaleza.

Finalmente, se concluye que la metodología planteada presenta potencial para evaluar bajo diferentes escenarios las recuperaciones de reservas antes del ingreso de dilución.

6.2. Conclusiones de modelos multivariantes

A partir de los modelos obtenidos, es posible concluir que variables como Estado de Vecinos (Entorno) y Columna Extraída (Operacional) generan un alto impacto en el fenómeno de ingreso de dilución. Siendo esta última modificable a escala operacional a fin de retrasar el ingreso de dilución. En conjunto a las variables mencionadas, también se observa la presencia de las variables Altura de Primario (Entorno) y Uniformidad (Operacional) en sus variantes para el punto y cluster evaluadas a 30 días.

La calibración teórica de modelos en base a igual sensibilidad y especificidad conlleva altos errores asociados a tonelajes extraídos con una subestimación de la entrada de dilución. Lo anterior dado que la base de datos preparada para la construcción de los modelos fue hecha en base a eventos raros, teniendo así un muestreo de datos que no es representativo para la totalidad, sin embargo, es necesario para que el evento sea considerado por las variables del modelo. No obstante, tras llevar a cabo una calibración mediante el uso de tonelajes, se determina un menor error en los modelos, los cuales permiten validarlos y determinar su eficacia ante la estimación de riesgo al ingreso de dilución. Conforme a lo anterior, es posible concluir que la metodología de calibración para modelos de esta naturaleza debe ser en base al objetivo requerido.

Particularmente, el modelo generalizado corresponde al que arrojó los mejores indicadores ante la evaluación de la capacidad predictiva. El presente modelo ante una calibración en torno a los tonelajes entregó un error promedio de 10.18 kton y 2.7 meses en su estimación, además de una confiabilidad y exactitud en torno al 86% y 90%, lo cual permite concluir que éste tiene una alta capacidad predictiva, además de un carácter conservador a pesar de las altas exigencias que se tienen en su evaluación (determinación a escala diaria del ingreso de dilución). Junto a lo anterior, el modelo presenta un desempeño mejor al observado por simulaciones llevadas a cabo en Rebo por Paredes (2012) y Armijo (2013), además de una complejidad y tiempos de simulación bajos.

Consecuente al modelo generalizado, es posible plantear una hipótesis ante la relación de los modelos y mecanismos de ingreso de dilución, la cual indica que ante la presencia de un mecanismo único de entrada de dilución para todo el Cluster (vertical para la totalidad del Cluster LHD según Paredes, 2012), se observen mejores resultados al aplicar un único y más simple modelo.

Finalmente, la interpretación del modelo generalizado permite inferir que ante una mayor altura de altura de columna (correspondiente a primario para el caso particular) y un mayor control de la uniformidad del punto y sus vecinos, es posible lograr retrasar el ingreso de la dilución. Por otro lado, conforme aumenta la extracción, la probabilidad de ingreso de dilución acumulada al 3% para el punto aumenta, lo cual de igual forma ocurre ante la presencia de vecinos diluidos, lo que es posible de interpretar como una presencia de dilución en sectores contiguos que potencialmente puede ingresar al punto de extracción.

6.3. Recomendaciones y trabajos futuros

En escenarios como el del Panel III de Andina, los modelos resultantes se proyectan como una herramienta eficaz para determinar el riesgo a la entrada de dilución y llevar a cabo planificación minera a corto plazo, permitiendo anticipar eventos dilución acumulada en la extracción. Si bien los resultados obtenidos utilizando los modelos son específicos para los datos y condiciones particulares de la mina en estudio, su aplicación se muestra prometedora para identificar este tipo de fenómenos en minería de caving. No obstante, se desprende que se requieren pruebas adicionales con datos de otras minas para evaluar la generalización del uso de este modelo en la predicción de ingreso de dilución ante condiciones diferentes a las evaluadas en el presente trabajo de memoria.

Junto a lo anterior, la metodología y modelos resultantes presenta potencial para evaluar el riesgo de puntos directamente bajo diferentes escenarios de entorno y variables operacionales.

Consecuentemente, desde el punto de vista práctico, los modelos de regresión logística corresponden a una herramienta que permitiría retrasar el ingreso de dilución a partir de decisiones operacionales respecto a las variables de este tipo, cuyos impactos se recomiendan cuantificar.

De igual forma, bajo el enfoque de una oportunidad de mejora, se recomienda observar la entrada de dilución caracterizándola como pulsos o entrada continua, y a partir de ello llevar a cabo la generación y evaluación de diversas variables dependientes, para así abarcar el fenómeno de ingreso de dilución desde otro punto de vista de esta variable, lo cual podría conducir a la generación de modelos todavía más robustos.

Conforme a lo planteado como oportunidad de mejora, también se recomienda llevar a cabo la evaluación de otras variables independientes y bajo el enfoque de otros rangos temporales. Esto guarda relación con la evaluación de variables tales como el ángulo de flujo que se genera producto de la diferencia de altura entre columnas, análisis de sectores con presencia de pre-acondicionamiento, inclusión de aspectos de geología y geotecnia, fragmentación, entre otras.

Finalmente, a fin efectuar un análisis más robusto entre herramientas de simulación convencionales y los modelos obtenidos con la metodología propuesta, se propone comparar otros sectores o minas explotadas vía Block/Panel Caving, llevando a cabo previamente la calibración del modelo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Armijo, F., Iribarra, S., & Castro, R. (2014). Experimental study of fines migration for caving mines. Santiago, Chile: Caving 2014.
2. Armijo, F. (2013). Estrategias de tiraje para el módulo de minería continua Andina MCA. Memoria para optar el Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
3. Castro, R., & Whiten, W. (2007). A new cellular automaton to model gravity flow in block. Gecamin Ltda.
4. Castillo, L. (2009). Análisis de la sensibilidad del índice de uniformidad, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
5. DeWolfe, V., 1981. Draw control in principle and practice at Henderson Mine. Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, (Ed: D. R. Stewart). Society of Mining Engineers, USA.
6. De la Fuente, S. (2011). Regresión Logística. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
7. Garcés, D., Castro, R., Valencia, M., & Armijo, F. Evaluación del riesgo de entrada temprana de barro para uso en minería de hundimiento durante el largo plazo. Santiago, Chile: UMining 2016.
8. Heslop T.G. (2010). Understanding the flow of caved ore and its influence on ore recoveries and dilution in a block cave. Caving 2010.
9. Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). Applied logistic regression (Vol. Vol. 398).
10. Iribarra, S. (2014). Estudio experimental de migración de finos en minería de caving, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
11. King, G., & Zeng, L. (2001). Logistic regression in rare events data. Political analysis.
12. Kvpil, R. (1965). Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers and Bins I. Int. J. Mining Sci. Vol. 2.
13. Kvpil, R. (1992). Sublevel Caving. SME Mining Engineering Handbook (2nd Edition ed.).
14. Laubscher, D. (2000). Block Caving manual. Prepared for the International Caving Study. JKMRRC and Itasca Consulting Group.
15. Laubscher, D. (1994). Cave Mining – the state of the art. Journal of South African.
16. Laubscher, D. (2006). Cave Mining Handbook. South Africa: De Beers Group.

17. Mawsley, C., Trueman, R., & Whiten W. (2001). Extending the Mathews stability graph for open-stope design. The Institution of Mining and Metallurgy.
18. Moss, A. (2011). An introduction to Block and Panel Caving. In BMO Capital Markets, Global Metals and Mining Conference.
19. Navia, I. (2014). Análisis de la aparición de agua barro en el sector diablo regimiento, División Teniente, Codelco. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
20. Paredes, P. (2012). Mecanismos de entrada de dilución en minas de Block/Panel Caving. Tesis para optar de Magister en Minería, Universidad de Chile.
21. Paredes, P., & Castro, R. (2014). Empirical observations of dilution in Panel Caving. Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy.
22. Paredes, P., & Pineda, M. (2014). An analysis of the lateral dilution entry mechanisms in Panel Caving. Santiago, Chile: Caving 2014.
23. Santibáñez, J. (2008). Efecto del tiraje en la definición de la zona movimiento, en un Block-Panel Caving. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
24. Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (Part 1 & Part 2). Chile: MassMin 2004.
25. Susaeta, A., Rubio, E., Henríquez, J., & País, G. (2008). Dilution behavior at Codelco panel cave mines. MassMin 2008.
26. Tabachnick, B. G., & Fidell, L. (2013). Using multivariate statistics (6th ed. ed.). Boston.
27. Valencia, M. E. (2013). Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en minería de Block/Panel Caving. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
28. Valencia, M. E. (2016). Modelamiento Empírico de ingreso de barro en minas de caving. Seminario de Tesis. Universidad de Chile.
29. Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case study in the Flemish Ardennes. Bélgica: Geomorphology.
30. Vergara, P. (2016). Estudio experimental de flujo gravitacional en minería de Panel Caving, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
31. Vergara, Y. (2014). Altura de Columna en Block/Panel Caving. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.

ANEXO A

En el presente anexo se exponen los elementos complementarios a los análisis de dilución desarrollados en el cuerpo del trabajo de memoria, además de análisis adicionales al estudio de variables influyentes en los modelos.

A continuación, se muestran puntos aleatorios de cada sector a fin de observar el comportamiento tipo pulsátil expuesto por la entrada de dilución en los puntos de extracción.

Cluster LHD

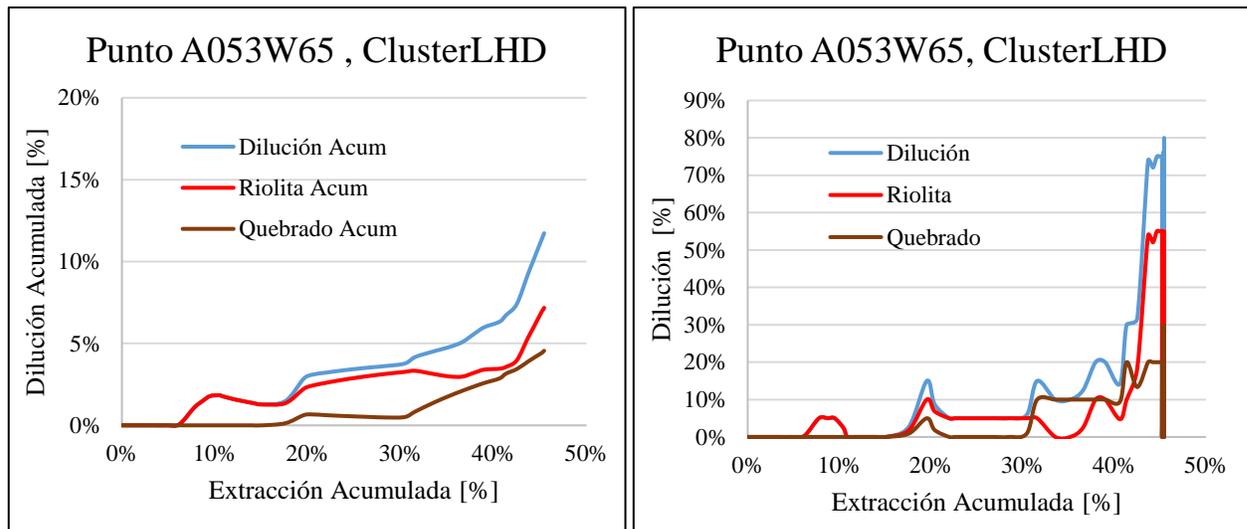


Figura 43. Comportamiento dilución acumulada LHD.

Dentro de las figuras, es importante describir cada uno de sus componentes. En una primera instancia se tiene la referencia a la Dilución, la cual corresponde a la suma de los elementos diluyentes riolita y quebrado. Conforme a lo anterior, la Dilución Acumulada [%] corresponde al cociente entre la dilución acumulada y el tonelaje acumulado extraído en el punto de extracción, mientras que la dilución [%] corresponde al cociente entre el contenido de dilución y tonelaje extraído del momento. Finalmente, en el eje de abscisas, la extracción acumulada hace referencia al porcentaje de columna extraído asociado al punto de extracción.

La curva del punto A053W65 del Cluster LHD posee un compartimiento tipo pulso, con un peak 80% de dilución a cerca de un 45% de columna extraída, con una dilución total acumulada de un 12%. Cabe destacar que a partir de cerca de un 20% de columna extraída la dilución total comienza a entrar de forma constante, lo cual equivale a cuando se tiene un 3% de dilución acumulada.

Cluster Parrillas

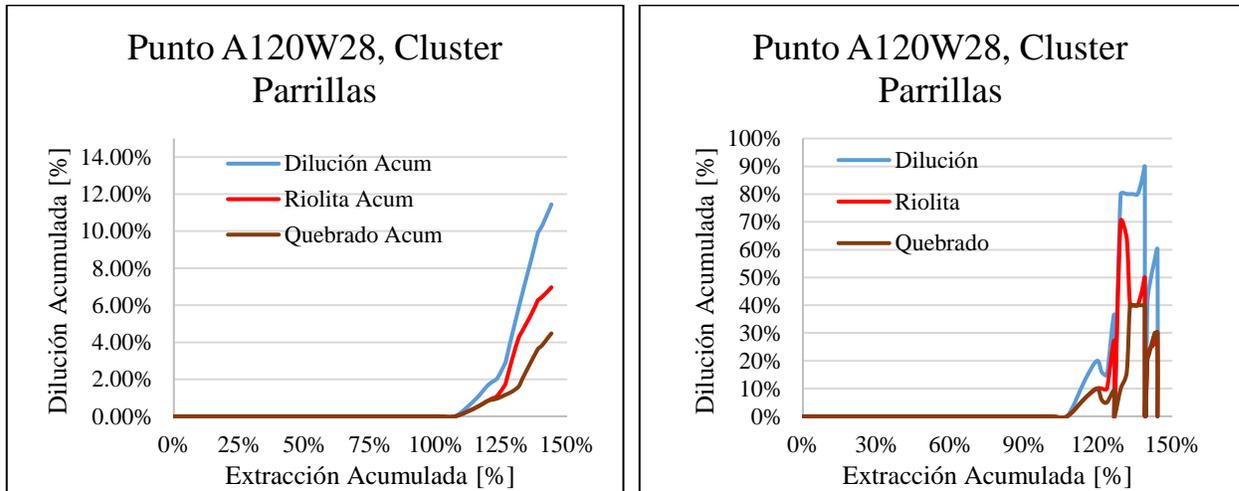


Figura 44. Comportamiento dilución acumulada Parrillas.

La curva del punto A120W28 del Cluster Parrillas posee un compartimiento constante en la entrada de dilución, con un peak de 90% de dilución a cerca de un 125% de su columna extraída, con una dilución total acumulada de 11%.

A modo de complemento de los análisis exploratorios de dilución, se exponen los histogramas con la distribución de columna extraída al momento del registro del evento de ingreso de dilución acumulada al 3% (véase Figura 45). Lo anterior según el mecanismo observado para el cual fueron separadas las bases de datos ante la construcción de los modelos multivariados vertical y lateral.

Finalmente, se muestra la matriz de uniformidad adaptada de Susaeta (2004) empleada para el cálculo de uniformidades a lo largo del presente trabajo de memoria (véase Tabla 35). Cabe destacar que la matriz empleada fue adaptada en base a obtener las más altas correlaciones con la variable dependiente.

La tabla expuesta permite determinar la clasificación de la extracción en uniforme o aislada a partir del índice de uniformidad y el número de vecinos del punto de extracción que se encuentran inactivos en términos de tiraje.

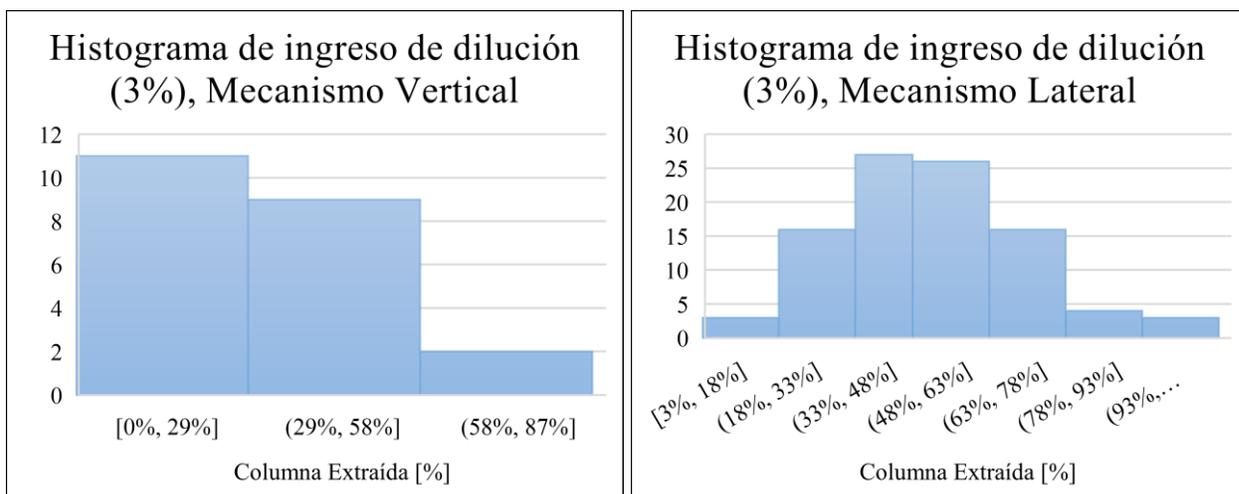


Figura 45. Histogramas de ingreso de dilución según mecanismo, LHD.

Tabla 35. Matriz de uniformidad adaptada de Susaeta.

	Índice Específico de Uniformidad					
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Número de Vecinos Inactivos	0	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Aislado	Aislado
	1	Uniforme	Uniforme	Aislado	Aislado	Aislado
	2	Uniforme	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	3	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	4	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

A continuación, en la Tabla 36 se muestra el resumen y descripción de las estadísticas de las variables presentes en la base de datos completa a partir de la cual se muestrea aleatoriamente y filtra para obtener las bases de datos de eventos raros. Además, a partir ella se lleva a cabo la calibración y validación de modelos para el Cluster LHD.

Cabe destacar que la base de datos se obtiene a partir de la extracción histórica desde el enero del año 2006 hasta enero del año 2012, para los 397 puntos analizados del Cluster LHD. Además, la información por punto es considerada hasta la ocurrencia del evento de ingreso de dilución acumulada al 3%, alcanzando así una totalidad de 157,071 datos en la base de trabajo.

Tabla 36. Resumen de estadísticas de variables Cluster LHD.

Variable	Descripción	Tipo	Escala	Mínimo	Máximo	Promedio	Des. Est.
Altura de Columna [m]	Expresa la altura de columna de mineral primario más secundario.	Entorno	-	208	640	366	123
Altura de Columna de Primario [m]	Expresa la altura de columna de roca primaria para un punto.	Entorno	-	0	256	108	69
Altura de Columna de Secundario [m]	Expresa la altura de columna de roca secundaria para un punto.	Entorno	-	16	496	258	94
Vecinos con presencia de dilución [%]	Indica el porcentaje de vecinos geométricos a un punto de extracción que tienen presencia de dilución.	Entorno	-	0%	100%	19%	30%
Porcentajes de Columna extraída [%]	Relación entre tonelaje extraído respecto a las toneladas in-situ para cada período.	Operacional	-	0%	107%	20%	18%
Índice de Uniformidad, Punto [%]	Indica el porcentaje de tonelajes que son extraídos de forma uniforme por el punto a distintas escalas de tiempo.	Operacional	Diaria	0%	100%	72%	45%
			Semanal	0%	100%	69%	35%
			30 Días	0%	100%	68%	29%
			90 Días	0%	100%	66%	27%
			180 Días	0%	100%	63%	26%
Índice de Uniformidad, Cluster [%]	Indica el porcentaje de tonelajes que son extraídos de forma uniforme por el punto y sus vecinos geométricos a distintas escalas de tiempo.	Operacional	Diario	0%	100%	54%	36%
			Semanal	0%	100%	52%	27%
			30 Días	0%	100%	51%	24%
			90 Días	0%	100%	50%	22%
			180 Días	0%	97%	48%	21%
Velocidades de Extracción, Punto [ton/m ² *día]	Expresa las velocidades de extracción asociadas al punto a distintas escalas de tiempo.	Operacional	Diario	0.030	15.701	0.649	0.489
			Semanal	0.030	10.546	0.652	0.352
			30 Días	0.030	10.546	0.655	0.300
			90 Días	0.030	10.546	0.663	0.277
			180 Días	0.030	10.546	0.667	0.266
Velocidades de Extracción, Cluster [ton/m ² *día]	Expresa las velocidades de extracción asociadas al punto y sus vecinos geométricos a distintas escalas de tiempo.	Operacional	Diario	0.004	3.562	0.517	0.293
			Semanal	0.004	2.759	0.585	0.224
			30 Días	0.004	2.730	0.608	0.199
			90 Días	0.004	2.730	0.626	0.185
			180 Días	0.004	2.730	0.632	0.178
Velocidades Máximas de Extracción, Punto [ton/m ² *día]	Expresa las velocidades máximas de extracción registradas en el punto para diferentes escalas de tiempo.	Operacional	Semanal	0.030	15.701	1.092	0.590
			30 Días	0.030	15.701	1.481	0.711
			90 Días	0.000	15.701	1.745	0.958
			180 Días	0.030	15.701	2.189	1.069
Velocidades Máximas de Extracción, Cluster [ton/m ² *día]	Muestra velocidades máximas de extracción registradas para el punto de extracción y sus vecinos geométricos en diferentes escalas.	Operacional	Semanal	0.030	15.701	1.609	0.716
			30 Días	0.030	15.701	2.105	1.009
			90 Días	0.030	15.701	2.689	1.391
			180 Días	0.030	15.701	3.256	1.716

ANEXO B

En el presente anexo se exponen los elementos complementarios a construcción de los modelos multivariantes de regresión logística. A continuación, se presentan las curvas de porcentaje promedio de eventos de cada una de las variables presentes en los modelos, siendo éstas evaluadas con respecto a la base de datos general. Lo anterior bajo el objetivo de evidenciar las asociaciones presentes entre variables independientes y la variable dependiente de los modelos.

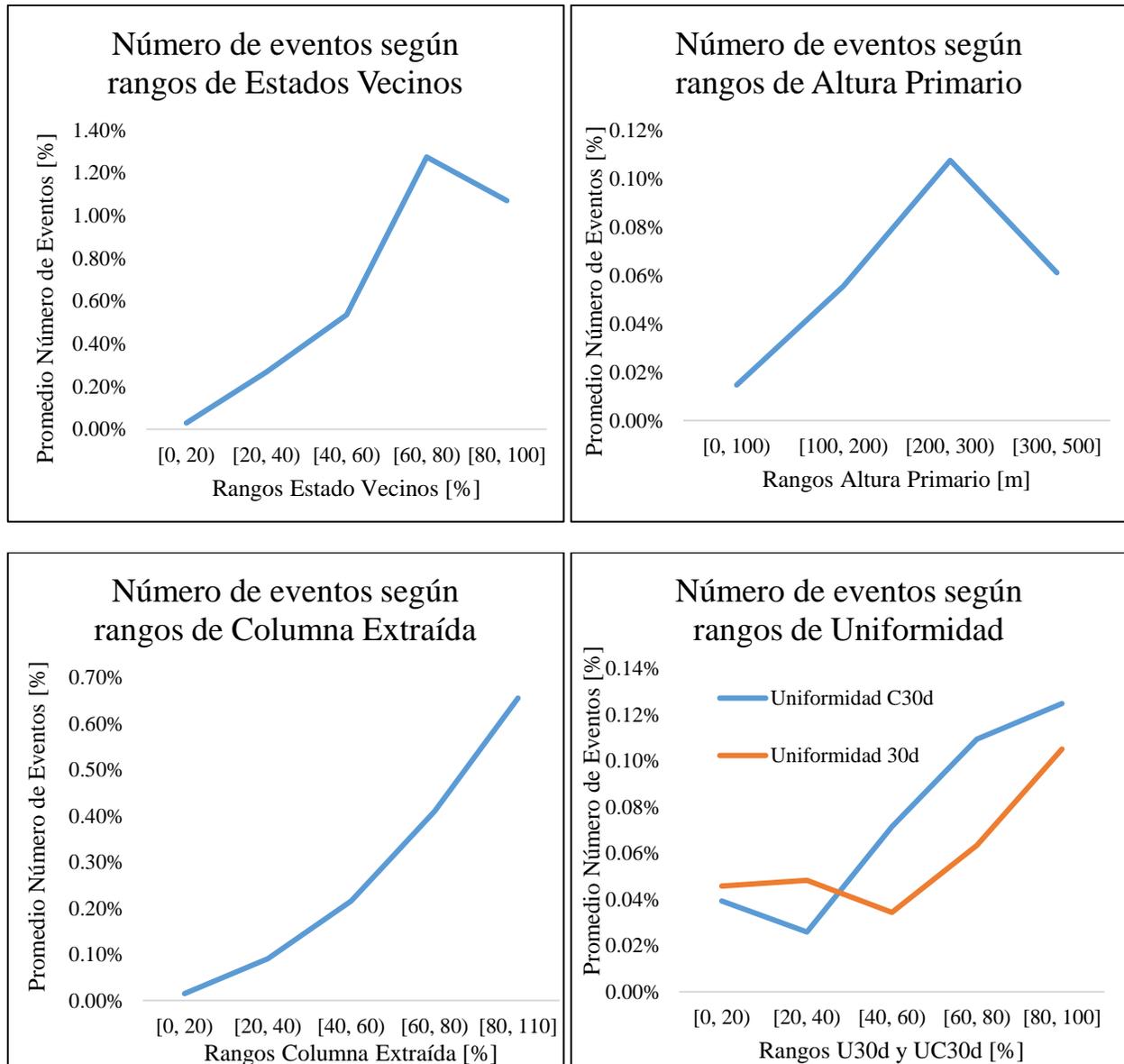


Figura 46. Curva de porcentaje de eventos para cada variable independiente de los modelos.

A partir de las curvas de la Figura 46 se observa que conforme aumenta el porcentaje de vecinos diluidos en torno a un punto de extracción se aprecia una mayor cantidad de ocurrencia de eventos

promedio (respecto a los números de datos en torno a los rangos). De igual forma, para el caso de la altura de primario se tiene una distribución en aumento conforme las alturas crecen, sin embargo, esto se debe a el alto número de datos y eventos asociados a la explotación de puntos con rangos de alturas de columna entre 100 y 300 metros. Para el caso de la columna extraída se observa que en medida que esta aumenta también lo hace el promedio de eventos ocurridos asociados a cada rango. Finalmente, para el caso de la uniformidad tanto del punto como del cluster, se observa que ante un aumento del rango de uniformidades el número promedio de eventos también lo hace. Respecto a lo anterior, cabe destacar que la mayor cantidad de datos está dada con porcentajes altos de uniformidad, lo cual explica que ante la ocurrencia de eventos posiblemente se estaba llevando a cabo una práctica de extracción uniforme. No obstante, también cabe destacar que a partir de observaciones de la base de datos se observa que ante la aparición de dilución en los puntos de extracción se comienzan a llevar a cabo prácticas operacionales de tiraje más uniforme.

Bajo la misma línea, se exponen los análisis ROC de los modelos propuestos. El área bajo la curva ROC, cuyo rango va desde 0.5 a 1.0, arroja una medida de la habilidad del modelo para discriminar entre aquellos sujetos que experimentan el resultado de interés, de aquellos que no.

El área bajo las curvas generadas proporciona una medida de discriminación que es la probabilidad estimada de que bajo el modelo ajustado ante el evento del ingreso de dilución el punto debiese tener una probabilidad mayor que la de un punto donde no hay ocurrencia del evento. A continuación, se exponen las curvas ROC para cada uno de los modelos:

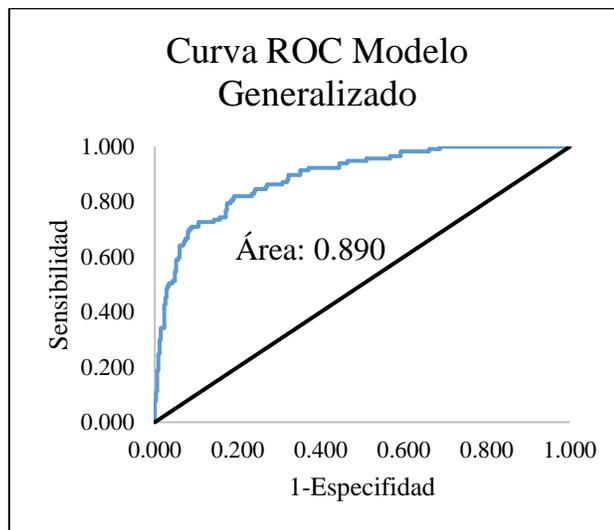


Figura 47. Curva ROC modelo generalizado.

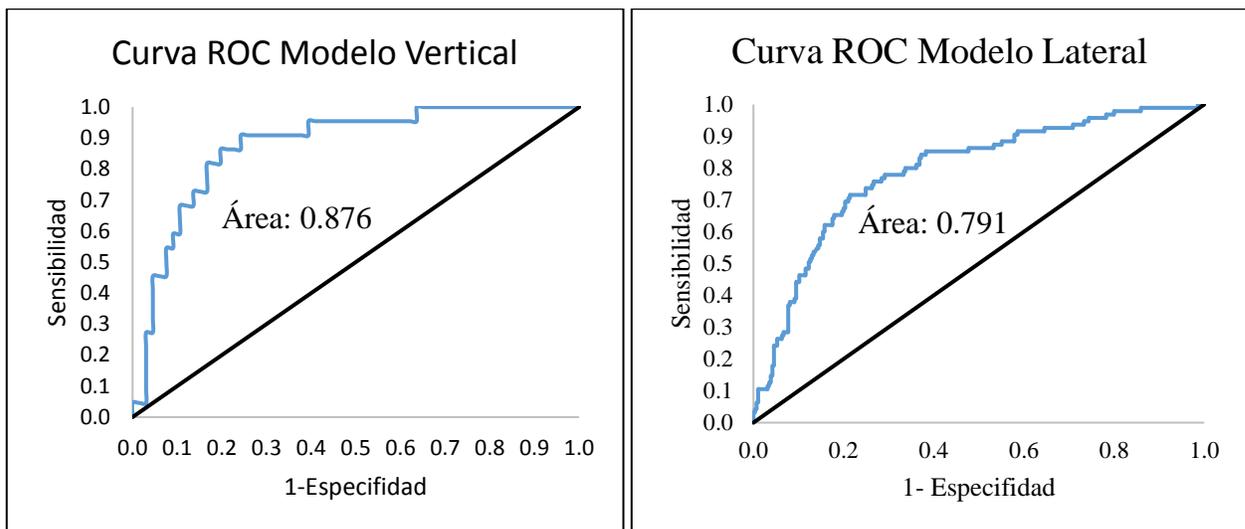


Figura 48. Curva ROC modelo vertical y aislado.

Se observa que el nivel de discriminación propuesto por el modelo generalizado es bueno, presentando un área de 0.89. De igual forma, lo observado para el modelo aislado corresponde a una discriminación buena, alcanzando un área de 0.876. Característicamente, es importante señalar que, si bien el valor es menor al expuesto por el modelo generalizado, éste sigue siendo bueno y estando en el mismo intervalo. Finalmente, para el caso del modelo lateral, se observa una discriminación menor que la obtenida por los dos anteriores. No obstante, ésta puede ser categorizada como aceptable.

ANEXO C

En la actual sección se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo bajo el objetivo de calibrar y evaluar los modelos mediante el uso de la base completa de datos. La calibración es realizada en torno a la obtención de los mejores indicadores, capacidad predictiva de eventos del modelo y minimizar el error asociado en términos de toneladas extraídas acumuladas antes o después de la ocurrencia del evento real.

Modelo Generalizado:

La Tabla 37 muestra los indicadores de las simulaciones del modelo obtenido, evaluando probabilidades de cortes variadas un 5% desde un 15% hasta un 60%. Cabe destacar que el número de puntos en la base de datos real indica un total de 117 puntos con registro del evento dilución acumulada a un 3%.

Tabla 37. Calibración en torno a toneladas, modelo generalizado.

Modelo Generalizado						
Probabilidad de Corte [%]	Puntos con eventos estimados correctamente	No eventos estimados correctamente	Eventos sobrestimados	Eventos subestimados	Exactitud del modelo [%]	Confiabilidad del modelo [%]
15	117	1	279	0	30	50
20	117	86	194	0	51	65
25	117	101	179	0	55	68
30	117	122	158	0	60	72
35	117	137	143	0	64	74
40	117	146	134	0	66	76
45	116	199	81	1	79	85
50	115	211	69	2	82	87
55	115	226	54	2	86	90
60	108	241	39	9	88	89

Respecto a la Tabla 37, cabe señalar que a partir del 40% el número de puntos con eventos estimados correctamente disminuye conforme aumenta la probabilidad de corte. Junto a lo anterior, para probabilidades de corte bajas se observa un alto número de eventos sobrestimados, tal como se da para el caso del uso de la calibración teórica.

A continuación, se muestra el promedio de los errores para la calibración teórica y la mejor obtenida a partir de las simulaciones ante la determinación de eventos correctamente estimados.

Tabla 38. Errores modelo generalizado.

Parámetros	Modelo (Corte teórico 20%)	Modelo (Corte 55%)
Error promedio de puntos con eventos estimados correctamente [kton]	78.2	10.2
Desviación estándar [kton]	37.0	40.5
Error promedio fecha [mes]	26.1	2.7
Desviación estándar fecha [mes]	11.4	12.1

Conforme a los resultados, se observa un error promedio en torno a los 2.7 meses en la estimación del punto de entrada de dilución acumulada, además de un bajo error asociado a tonelajes, lo cual permite inferir que el modelo presenta una buena capacidad predictiva. Cabe destacar que el error de períodos es menor en comparación a herramientas de simulación como Rebop.

Modelo Interactivo:

La Tabla 39 muestra los indicadores de las simulaciones del modelo obtenido, evaluando probabilidades de cortes variadas un 5% desde un 15% hasta un 60 %. Junto a lo anterior, es importante señalar que ambos modelos fueron simulados interactivamente bajo una misma probabilidad de corte, salvo para el caso particular del corte teórico.

Tabla 39. Calibración en torno a tonelajes, modelo interactivo.

Modelo Interactivo						
Probabilidad de Corte [%]	Puntos con eventos estimados correctamente	No eventos estimados correctamente	Eventos sobrestimados	Eventos subestimados	Exactitud del modelo [%]	Confiabilidad del modelo [%]
15	117	1	279	0	30	50
20	117	84	196	0	51	65
25	117	139	141	0	64	75
30	117	158	122	0	69	78
35	105	183	97	12	73	78
40	104	197	83	13	76	80
45	102	208	72	15	78	81
50	99	224	56	18	81	82
55	80	239	41	37	80	77
60	65	245	35	52	78	72
V(26) y L(28)	94	204	76	23	75	77

Cabe señalar que, al igual que en el modelo generalizado, se observa que ante un aumento de la probabilidad de corte el número de puntos con eventos estimados correctamente disminuye, aumentando los eventos subestimados. Junto a lo anterior, para probabilidades de corte baja se observa un alto número de eventos sobrestimados.

A partir de la Tabla 39 se observa que una probabilidad de corte de 50% en común para el modelo vertical y lateral entrega los mejores resultados ante lo evaluado. No obstante, lo anterior es posible de optimizar en la medida en que se prueben probabilidades de corte diferentes según modelo, además de saltos menores a un 5% entre una probabilidad y otra.

A continuación, se muestra el promedio ante la determinación de eventos correctamente estimados a partir de las simulaciones.

Tabla 40. Errores modelo interactivo.

Parámetros	Modelo (Corte teórico)	Modelo (Corte 50%)
Error promedio de puntos con eventos estimados correctamente [kton]	44.0	21.0
Desviación estándar [kton]	48.3	54.0
Error promedio fecha [mes]	13.9	7.6
Desviación estándar fecha [mes]	15.6	17.4

Conforme a los resultados, se observa un error promedio en meses y tonelajes mayor a los expuestos por el modelo generalizado, lo cual permite inferir que el modelo interactivo presenta una capacidad predictiva menor del comportamiento de la dilución para la base de datos en estudio.

A continuación, se presenta una vista en planta de la secuencia de ocurrencia de eventos según datos simulados. A partir de lo planteado, se puede observar la baja variabilidad expuesta por parte del modelo generalizado, presentando la mayor parte de los ingresos de dilución durante el año 2010. Por otro lado, el modelo interactivo presenta una distribución más heterogenia, con una naturaleza conservadora ante la predicción del evento.

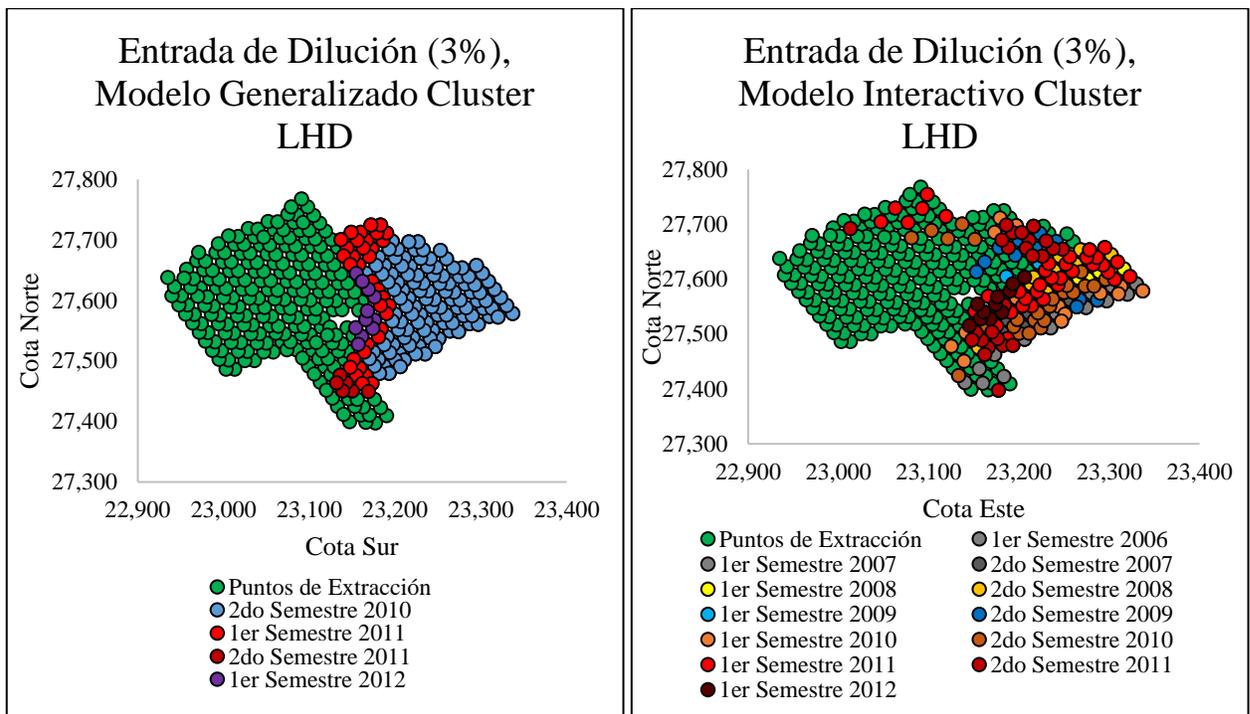


Figura 49. Secuencia de ocurrencia de eventos simulados, Cluster LHD.

