



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS GEOMÉTRICO-ESTRUCTURAL Y CINEMÁTICO DE BLOQUES
EN CAJAS LATERALES DE LAS UNIDADES MINERALES YA EXCAVADAS Y
FUTURAS QUE PUEDAN AFECTAR AL ACCESO PRINCIPAL DEL SECTOR
PRODUCTIVO OS1, S.C.M. ATACAMA KOZAN, TIERRA AMARILLA,
ATACAMA, CHILE

Mario Sebastián Muñoz Poblete

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS GEOMÉTRICO-ESTRUCTURAL Y CINEMÁTICO DE BLOQUES EN
CAJAS LATERALES DE LAS UNIDADES MINERALES YA EXCAVADAS Y
FUTURAS QUE PUEDAN AFECTAR AL ACCESO PRINCIPAL DEL SECTOR
PRODUCTIVO OS1, S.C.M. ATACAMA KOZAN, TIERRA AMARILLA,
ATACAMA, CHILE

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de Geólogo.

Profesora guía: Dra. Paulina Fuentes Molina

Mario Sebastián Muñoz Poblete

Copiapó, Chile 2025

Dedicada a mis padres, David y Marcela.

A la calma no más.

Agradecimientos

Agradezco a la vida por mis padres, David Muñoz y Marcela Poblete, quienes, a pesar de la adversidad, y motivados por su amor incondicional, dieron todo de sí para educarme y brindarme la posibilidad de ser profesional. Ojalá me alcance la vida para poder retribuirles y honrar su apoyo y sacrificio.

Agradezco a todos aquellos que recorrieron este camino junto a mí y fueron inspiración, apoyo y fortaleza. A mis amigos, por ser luz siempre en todo momento. A mis compañeros de carrera y hoy grandes amigos, Gerardo Mérida y Carlos Salinas, por su colaboración, esfuerzo y comprensión que nos llevó a cerrar esta etapa de nuestras vidas de manera exitosa.

Con profunda estima y reconocimiento, extiendo mi más sincera gratitud a S.C.M. Atacama Kozan, específicamente a los integrantes de la Gerencia de Ingeniería, quienes me han formado y dirigido durante todos estos años como profesional mediante su entrega de conocimiento sin reparos. Agradezco especialmente a Sebastián Lozano, por ser mi mentor y guía en cuanto al conocimiento minero y geomecánico, y a Jonathan Vallejos, apoyo fundamental de este trabajo y sin el cual no hubiese sido posible realizarlo.

Finalmente, expreso mi total gratitud hacia el departamento de Geología de la Universidad de Atacama y, en particular, a mi guía la doctora Paulina Fuentes, por su paciencia y apoyo durante todos estos años hasta la presentación final de este trabajo. A todo aquel que aportó un grano de arena a mi formación académica, muchas gracias.

Resumen

Este estudio se llevó a cabo en el sector OS1 de la mina subterránea S.C.M. Atacama Kozan, ubicada en la Región de Atacama, Chile, con el propósito de identificar zonas de inestabilidad estructural en el acceso principal del área, producto de la interacción entre discontinuidades geológicas. Dada la alta complejidad estructural del macizo rocoso, se aplicó un enfoque práctico basado en el análisis cinemático y modelamiento tridimensional para identificar cuñas estructurales potencialmente inestables. El trabajo se centró en el análisis de 18 cajas laterales pertenecientes a caserones explotados y futuros pilares, los cuales presentan relevancia operativa por su cercanía a las labores de tránsito y extracción. Se realizó un levantamiento geológico estructural detallado en terreno, identificando diaclasas, fallas mayores y menores, cuya distribución e interacción fue procesada mediante análisis estereográficos y modelamiento tridimensional, a través de los softwares Dips y Unwedge respectivamente. Este modelamiento permitió simular la formación y posible activación de cuñas estructurales. Se adoptó un criterio de estabilidad basado en un factor de seguridad (FS) mínimo de 1.4, conforme a los estándares utilizados en la industria minera.

Los resultados revelaron la existencia de 33 combinaciones estructurales con riesgo de desprendimiento, especialmente en zonas donde convergen múltiples estructuras. Se generaron alertas geotécnicas preventivas y se establecieron prioridades de intervención para reforzamiento, monitoreo o rediseño de excavaciones. El análisis también incorporó visualizaciones 3D y comparación con morfologías reales usando el software Vulcan, lo que permitió validar simulaciones en función del comportamiento observado en terreno.

A pesar de ciertas limitaciones relacionadas con la idealización geométrica de los modelos y el uso de parámetros geomecánicos teóricos por falta de ensayos específicos, el estudio proporciona una base operativa sólida para la toma de decisiones en seguridad minera. Además, ofrece una metodología replicable para otros sectores del yacimiento o faenas con características estructurales similares.

Palabras claves: Interacción estructural - Cinemática de cuñas – Factor de seguridad – Prevención geotécnica.

Abstract

This study was conducted in the OS1 sector of the underground mine S.C.M. Atacama Kozan, located in the Atacama Region of Chile, with the objective of identifying structurally unstable zones along the main access of the area, because of the interaction between geological discontinuities. Given the high structural complexity of the rock mass, a practical approach based on kinematic analysis and three-dimensional modeling was applied to identify potentially unstable structural wedges. The work focused on the analysis of 18 lateral walls associated with previously mined stopes and future pillars, which are operationally relevant due to their proximity to key haulage and extraction drifts. A detailed structural geological survey was carried out in the field, identifying joints, major faults, and minor faults. Their distribution and interaction were processed using stereographic analysis and 3D modeling via Dips and Unwedge software, respectively. This modeling enabled the simulation of the formation and potential activation of structural wedges. A stability criterion based on a minimum Safety Factor (FS) of 1.4 was adopted, in accordance with standards commonly used in the mining industry.

The results revealed the existence of 33 structural combinations with detachment risk, particularly in areas where multiple discontinuities converge. Preventive geotechnical alerts were generated, and intervention priorities were established for reinforcement, monitoring, or redesign of excavations. The analysis also incorporated 3D visualizations and comparison with actual excavation morphologies using Vulcan software, allowing the validation of simulations against observed in-situ behavior.

Despite certain limitations related to the geometric idealization of models and the use of theoretical geomechanical parameters due to the lack of specific laboratory tests, the study provides a solid operational basis for informed decision-making in mine safety. Moreover, it offers a replicable methodology for other sectors of the deposit or operations with similar structural conditions.

Keywords: Structural interaction – Wedge kinematics – Safety factor – Geotechnical prevention.

ÍNDICE

1	MARCO INTRODUCTORIO	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	3
1.3	Hipótesis	4
1.4	Objetivos	4
1.4.1	Objetivo general	4
1.4.2	Objetivos específicos	4
1.5	Ubicación y acceso.....	5
1.6	Justificación	6
1.7	Resumen metodológico	7
1.8	Limitaciones.....	8
2	MARCO TEÓRICO	9
2.1	Fundamentos de geomecánica y estabilidad de cajas subterráneas	9
2.1.1	Estabilidad de excavaciones y mecanismos de falla	9
2.1.2	Parámetros clave para el análisis geomecánico	10
2.1.3	Importancia del <i>back análisis</i> geomecánico	11
2.2	Tipología de discontinuidades: diaclasas y fallas	11
2.3	Teoría del análisis cinemático de cuñas.....	12
2.4	Parámetros geotécnicos considerados	15
2.4.1	Criterio de Mohr-Coulomb	15
2.4.2	Factor de seguridad (FS).....	16
2.5	Factores que afectan la estabilidad de excavaciones subterráneas	17
2.5.1	Factores geológicos y estructurales.....	17
2.5.2	Factores hidrogeológicos y geotécnicos.....	17
2.5.3	Factores operacionales y de diseño	18
3	MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO.....	19
3.1	Geología distrital.....	19
3.1.1	Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano inferior):..	19
3.1.2	Grupo Chañarcillo: (Cretácico Inferior):	20
3.1.3	Cuerpos intrusivos:	20
3.1.4	Rocas metamórficas	21

3.2	Geología estructural distrital	21
3.3	Geología local de S.C.M. Atacama Kozan	23
3.4	Geología estructural local de S.C.M. Atacama Kozan	24
3.5	Caracterización geotécnica de S.C.M. Atacama Kozan	25
4	METODOLOGÍA	27
4.1	Caracterización del sector y selección de cajas a analizar	27
4.2	Elaboración de modelo estructural conceptual	28
4.3	Softwares utilizados y consideraciones de aplicación	31
4.3.1	Dips y Unwedge – Rocscience	32
4.3.2	Vulcan – Maptek	36
4.3.3	AutoCAD y Excel – Autodesk y Microsoft	36
4.4	Criterios para la identificación de cuñas sensibles (FS < 1.4)	36
5	RESULTADOS	37
5.1	Introducción al desarrollo del estudio	37
5.2	Determinación de set de diaclasas representativos	37
5.3	Análisis cinemático de cuñas por caja de estudio	38
5.3.1	Caja A	39
5.3.2	Caja B	41
5.3.3	Caja C	42
5.3.4	Caja D	44
5.3.5	Caja E	45
5.3.6	Caja F	47
5.3.7	Caja G	48
5.3.8	Caja H	50
5.3.9	Caja I	51
5.3.10	Caja J	53
5.3.11	Caja K	56
5.3.12	Caja L	57
5.3.13	Caja M	59
5.3.14	Caja N	60
5.3.15	Caja O	62
5.3.16	Caja P	65

5.3.17	Caja Q.....	67
5.3.18	Caja R.....	69
5.4	Validación estereográfica de la cinemática de cuñas críticas	70
5.4.1	Cuña C9A.....	70
5.4.2	Cuña C7A.....	71
5.4.3	Cuña C2I	72
5.4.4	Cuña C22J.....	73
5.4.5	Cuña C25J.....	74
5.4.6	Cuña C20N.....	75
5.4.7	Cuña C5O.....	76
5.4.8	Cuña C1P	76
5.4.9	Cuña C3Q.....	77
6	DISCUSIONES.....	79
6.1	Relación geométrica-estructural de cuñas sensibles	79
6.2	Estabilidad de cuñas en base a la morfología actual de caserones	80
6.3	Recomendaciones	84
7	CONCLUSIONES.....	85
8	REFERENCIAS	87
9	ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Limitaciones del estudio.....	8
Tabla 2.1. Parámetros geomecánicos del análisis de estabilidad de taludes y cajas subterráneas.....	10
Tabla 2.2. Comparativa entre propiedades de diaclasas y fallas..	12
Tabla 2.3. Criterios básicos para evaluar la movilidad de una cuña o bloque.....	15
Tabla 2.4. Clasificación de factores por nivel de impacto.....	18
Tabla 3.1. Resumen de características geotécnicas asociados a cada UGT definida en Atacama Kozan..	26
Tabla 5.1. Familias de diaclasas principales determinadas en el sector OS1.....	38
Tabla 5.2. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja A.....	39
Tabla 5.3. Información de cuñas conformadas en la Caja A.....	40
Tabla 5.4. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja B.....	41
Tabla 5.5. Información de cuñas conformadas en la Caja B.....	42
Tabla 5.6. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja C.....	42
Tabla 5.7. Información de cuñas conformadas en la Caja C.....	43
Tabla 5.8. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja D.....	44
Tabla 5.9. Información de cuñas conformadas en la Caja D.....	44
Tabla 5.10. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja E.....	45
Tabla 5.11. Información de cuñas conformadas en la Caja E.....	46
Tabla 5.12. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja F.....	47
Tabla 5.13. Información de cuñas conformadas en la Caja F.....	48
Tabla 5.14. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja G.....	48
Tabla 5.15. Información de cuñas conformadas en la Caja G.....	49
Tabla 5.16. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja H.....	50
Tabla 5.17. Información de cuñas conformadas en la Caja H.....	51
Tabla 5.18. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja I.....	52
Tabla 5.19. Información de cuñas conformadas en la Caja I.....	52
Tabla 5.20. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja J.....	54
Tabla 5.21. Información de cuñas conformadas en la Caja J.....	55
Tabla 5.22. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja K.....	56
Tabla 5.23. Información de cuñas conformadas en la Caja K.....	57
Tabla 5.24. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja L.....	58
Tabla 5.25. Información de cuñas conformadas en la Caja A.....	58
Tabla 5.26. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja M.....	59
Tabla 5.27. Información de cuñas conformadas en la Caja M.....	60
Tabla 5.28. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja N.....	61
Tabla 5.29. Información de cuñas conformadas en la Caja N.....	62
Tabla 5.30. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja O.....	63
Tabla 5.31. Información de cuñas conformadas en la Caja O.....	64

Tabla 5.32. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja P.....	65
Tabla 5.33. Información de cuñas conformadas en la Caja P.....	66
Tabla 5.34. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja Q.....	67
Tabla 5.35. Información de cuñas conformadas en la Caja Q.....	68
Tabla 5.36. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja R.....	69
Tabla 5.37. Información de cuñas conformadas en la Caja R.	69
Tabla 6.1. Resumen de cuñas identificadas con factores de seguridad menores al 1.4...	79
Tabla 9.1. Parámetros y valores asociados a la determinación del índice geotécnico de RMR_B	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos S.C.M. Atacama Kozan.....	5
Figura 2.1. Proyección estereográfica de cuña que se desprenderá por gravedad.	13
Figura 2.2. Proyección estereográfica de cuña que se desprenderá por deslizamiento. .	14
Figura 2.3. Proyección estereográfica de cuña estable que no se desprenderá bajo ningún caso.....	14
Figura 3.1. Mapa geológico del distrito Candelaria-Punta del Cobre.....	22
Figura 3.2. Columna estratigráfica del yacimiento Atacama Kozan, indicando unidades geológicas informales.	23
Figura 3.3. Mapa topográfico del yacimiento de Atacama Kozan (no a escala), donde se indica las trazas de la Falla Este (color rojo) y Falla Santa Gemita (color verde).....	25
Figura 3.4. Perfil transversal esquemático del yacimiento Atacama Kozan con la distribución relativa de las unidades geotécnicas definidas (no a escala).....	26
Figura 4.1. Levantamiento y representación estructural mediante referencia de plano teórico a la gradiente de la sección de un túnel.....	29
Figura 4.2. Configuración general de los datos de entrada en el software Unwedge.	33
Figura 4.3. Configuración de propiedades asociadas a las discontinuidades en el software Unwedge.	34
Figura 4.4. Configuración de campo tensional. No se considera dentro de los análisis realizados.....	35
Figura 5.1. Proyección estereográfica y concentración de polos de diaclasas levantadas en el sector OS1.	38
Figura 5.2. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C9A.	70
Figura 5.3. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C7A.	71
Figura 5.4. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C2I.....	72
Figura 5.5. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C22J.....	73
Figura 5.6. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C25J.....	74
Figura 5.7. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C20N.	75
Figura 5.8. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C5O.	76

Figura 5.9. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C1P.	77
Figura 5.10. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C3Q.	78
Figura 6.1. Morfología real del caserón OS1-3 y la caja estudiada N (no a escala).	81
Figura 6.2. Morfología real del caserón OS1-3 y la caja estudiada O (no a escala).	82
Figura 6.3. Morfología real del caserón OS1-4 y la caja estudiada Q (no a escala).	82
Figura 6.4. Morfología real del caserón OS1-13 y la caja estudiada A (no a escala).	83
Figura 9.1. Plano oficial de análisis geométrico estructural del sector OS1, S.C.M. Atacama Kozan (no a escala).	91
Figura 9.2. Plano oficial de análisis geométrico estructural enfocado al Acceso principal del sector productivo OS1, S.C.M. Atacama Kozan (no a escala).	92

1 MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

La minería subterránea moderna presenta una serie de desafíos cada vez más complicados en materia de estabilidad geomecánica, en especial en sectores donde convergen múltiples estructuras geológicas que interactúan de forma dinámica con las excavaciones, en este contexto, el presente estudio de análisis geométrico-estructural se desarrolla en el sector OS1 de la mina S.C.M. Atacama Kozan, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las discontinuidades presentes en las cajas de caserones y pilares que están asociados e interactúan con su labor principal de acceso y tránsito, identificando mediante un adecuado análisis cinemático de cuñas los escenarios potenciales de inestabilidad que puedan comprometer la seguridad de las operaciones.

La caracterización estructural de las paredes de excavaciones se constituye en una etapa crítica en cuanto a la planificación minera subterránea, ya que la intersección de planos estructurales puede generar cuñas susceptibles al colapso por gravedad o influencias tensionales (Palmström, 2005). Lo anterior permite anticipar las condiciones geotécnicas que enfrentarán las labores durante su desarrollo. Como fue determinado por la empresa consultora en geomecánica FF Geomechanics (2021; 2024), en los estudios realizados en los sectores Kou y Farellones de Atacama Kozan, las principales estructuras geológicas como diaclasas, fallas menores y fallas mayores pueden interactuar y generar configuraciones de bloques o cuñas que son desfavorables, con riesgo de desprendimiento, significando fenómenos que representan amenazas directas para el personal y los equipos, y que también afectan la continuidad operativa y la integridad de los accesos.

En respuesta a esta problemática, S.C.M. Atacama Kozan ha iniciado la incorporación de métodos de modelamiento estructural y desprendimiento de bloques, los cuales son apoyados en herramientas computacionales como el *software* Unwedge de Rocscience, con el que se ha podido simular tridimensionalmente el comportamiento de cuñas generadas por la intersección de discontinuidades geológicas. La metodología aplicada contempla análisis determinísticos y probabilísticos, haciendo factible la evaluación del

riesgo mediante el cálculo del factor de seguridad (FS) y la estimación de la probabilidad de activación de cada escenario geométrico.

Este trabajo tiene por objetivo sistematizar y presentar el análisis realizado en el sector OS1, pero centrado de manera específica al acceso principal perteneciente a esta área de estudio, lo cual comprende el análisis de 18 cajas laterales distribuidas en caserones ya explotados y pilares futuros seleccionados, de un total de 28 cajas laterales determinadas como relevantes y analizables, distribuidas en todo el espacio abarcado por el sector OS1. La evaluación se desarrolló bajo un enfoque técnico, incorporando propiedades geomecánicas características del macizo rocoso, parámetros estructurales obtenidos mediante mapeo geológico in situ y también realizando una verificación de las condiciones operacionales. Se adoptó un umbral de $FS = 1,4$ como criterio mínimo para clasificar una cuña como estable, conforme a estándares utilizados en minería subterránea y aceptados por el organismo fiscalizador Sernageomin, lo que permitió discriminar aquellos bloques potencialmente inestables.

El alcance del análisis estructural va más allá de la validación estática de estabilidad, ya que permite anticipar escenarios de falla, establecer alertas geotécnicas tempranas y optimizar los diseños de excavaciones y sostenimiento (Singh y Goel, 2011). Lo anterior incide directamente en la necesidad de monitoreo geotécnico, reconocer patrones estructurales recurrentes y generar una serie de recomendaciones operacionales. De este modo, el estudio se convierte en una herramienta práctica y estratégica para la prevención de incidentes, la optimización de recursos y la planificación segura de labores subterráneas.

Finalmente, este trabajo quiere contribuir, desde una perspectiva académica, al entendimiento aplicado de los fenómenos de inestabilidad estructural en contextos de minería subterránea, por medio del uso de herramientas de análisis cinemático, entregando un enfoque metodológico replicable y adaptable a otras zonas de la operación o a proyectos mineros con condiciones geológicas similares en la región o país.

1.2 Planteamiento del problema

Lograr garantizar la estabilidad en excavaciones subterráneas es una de las principales preocupaciones en la minería actual, debido a que tiene un impacto directo en la seguridad del personal, la continuidad del proceso productivo y la sostenibilidad de las operaciones. En especial, el comportamiento del macizo rocoso en zonas estructuralmente complejas o difíciles está condicionado por la presencia y orientación de discontinuidades geológicas tales como fallas, diaclasas y diques, cuya interacción puede dar lugar a la formación de cuñas inestables. Las fallas estructurales asociadas a la intersección de múltiples discontinuidades son las principales responsables de mecanismos de colapso local en minería subterránea (Sönmez et al., 2017).

En el acceso principal de sector OS1 de la mina SCM Atacama Kozan se ha identificado una gran red geológica-estructural que interceptan labores en operación y también los caserones explotados y las futuras excavaciones productivas planificadas, lo que aumenta de manera importante el riesgo de desprendimientos. La evaluación temprana de la estabilidad mediante modelos cinemáticos y probabilísticos es esencial para reducir accidentes y optimizar los diseños de las excavaciones (Wang et al., 2018), sin embargo, este tipo de análisis aún no se considera de una forma adecuada en las etapas iniciales del diseño minero, generando de esta manera una vulnerabilidad innecesaria desde el punto de vista operativo. La interacción entre estas discontinuidades requiere ser evaluada con herramientas analíticas que permitan anticipar escenarios de falla antes de que ocurran, ya que el abordaje de incidentes reduce la eficacia de las acciones correctivas y eleva los costos operacionales y también de seguridad.

Si bien existen herramientas potentes como el software Unwedge, su uso seguro normalmente suele verse limitado por la falta de una composición debidamente adecuada con estudios estructurales detallados. La incorporación de modelos tridimensionales de cuñas en la planificación minera permite anticipar condiciones de inestabilidad y ajustar el diseño geotécnico con mayor precisión (Li et al., 2020), ya que la ausencia de un diagnóstico estructural anticipado dificulta la aplicación de medidas preventivas oportunas, como el saneamiento y fortificación focalizada, el rediseño de caserones o la instalación de sistemas de alerta temprana mediante monitoreo geotécnico.

En consecuencia, el problema central identificado es la falta de un análisis estructural integral y anticipado para el sector OS1, que permita detectar zonas críticas mediante modelamientos determinísticos y probabilísticos. Esta carencia limita la capacidad de la operación para tomar decisiones informadas frente a condiciones geotécnicas complejas, exponiendo a la mina a escenarios de falla estructural no previstos y afectando tanto la eficiencia operativa como la seguridad en las faenas subterráneas.

1.3 Hipótesis

Dado a que los mecanismos de estabilidad del sector OS1 de la mina S.C.M Atacama Kozan están controlados principalmente por la interacción de discontinuidades geológicas, la aplicación de un análisis geométrico-estructural detallado de las cajas de las actuales y futuras excavaciones que interactúan con el acceso principal del sector mediante modelamientos determinísticos y probabilísticos utilizando el software Unwedge, posibilitará identificar oportunamente las combinaciones de discontinuidades que forman cuñas con factores de seguridad inferiores a 1.4, permitiendo anticipar condiciones de inestabilidad estructural y establecer medidas preventivas operacionales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Identificar las condiciones geométrico-estructurales desfavorables que comprometan la estabilidad de caserones, pilares y túneles conformantes del acceso principal del sector OS1 de S.C.M. Atacama Kozan.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Determinar las configuraciones estructurales que presentan riesgo de inestabilidad, evaluando el factor de seguridad (FS) de cuñas teóricas generadas en función de la geometría actual de caserones y pilares.
- ii. Identificar la probabilidad de activación de bloques potencialmente inestables que intersectan las paredes verticales de las excavaciones y labores principales de acceso, cuantificando su nivel de riesgo geomecánico.

- iii. Establecer alertas geotécnicas preventivas según la condición actual de las excavaciones y el volumen de las cuñas involucradas, priorizando zonas de intervención.
- iv. Evaluar el estado actual de estabilidad de las cuñas identificadas, en base a la morfología topográfica real y a los parámetros geomecánicos del macizo rocoso.

1.5 Ubicación y acceso

S.C.M. Atacama Kozan, se localiza a aproximadamente a 16 km al SE de Copiapó y a 5 km al W de Tierra Amarilla en el Cerro El Bronce, distrito Punta del Cobre, comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile (véase Figura 1.1). Las coordenadas del ingreso a la faena en UTM (Datum WGS 84 – 19S) son N 6.957.048,10 y E 374.446,70, y se encuentra a una cota promedio de 525 msnm. Se emplaza en la Formación Punta del Cobre (Espinoza, 1990), en el flanco occidental del Río Copiapó. Su acceso tradicional es por Avenida Copayapu o Avenida Los Carrera hasta llegar a la ruta C-35, luego se debe avanzar 7 km hasta el cruce vial minero con la Minera Punta del Cobre y S.C.M. Carola, posteriormente se gira a la derecha siguiendo un tramo recto de unos 0.6 km y finalmente a la izquierda por 1.5 km hasta llegar a la faena de estudio. Los caminos mineros permiten acceder de manera segura y sin mayores dificultades a S.C.M. Atacama Kozan.

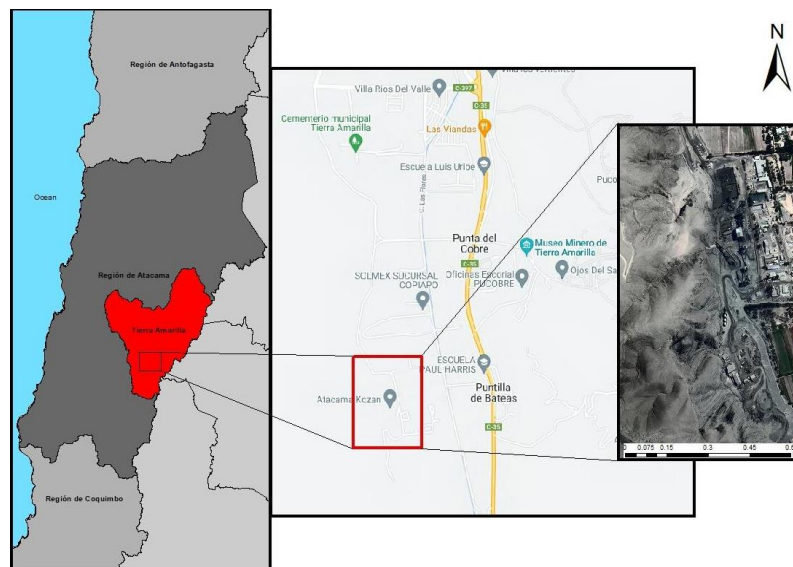


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos S.C.M. Atacama Kozan. Elaboración propia.

1.6 Justificación

El desarrollo de estudios geomecánicos enfocados en la caracterización estructural de excavaciones subterráneas se ha vuelto una necesidad cada vez más indispensable en la minería, desde el punto de vista operativo, técnico y de seguridad, poder identificar con anticipación cuñas que podrían volverse inestables permite implementar medidas correctivas a tiempo, reduciendo así los riesgos de colapsos locales y protegiendo tanto al personal como a la infraestructura.

Para el acceso principal del sector OS1 de S.C.M. Atacama Kozan, existe la presencia de múltiples estructuras geológicas, identificadas a partir de mapeos geológicos-estructurales de detalle. Lo anterior conforma una intensa red estructural característica del área, donde destacan la presencia de sets de diaclasado bien definidos, elevadas interacciones entre estructuras mayores y menores, y una disposición de túneles y paredes de excavaciones que configura un escenario de riesgo geotécnico potencial del sector de estudio, el que requiere ser abordado bajo un enfoque preventivo y sistemático.

Basándose en que la estabilidad de los macizos rocosos en minería subterránea depende en gran medida del análisis tridimensional de la geometría de las discontinuidades y su relación con las excavaciones (Li et al., 2020), la decisión de realizar un análisis geométrico-estructural de las cajas de excavación y cinemático de cuñas se fundamenta en tres pilares clave:

1. **Seguridad operacional:** detectar bloques con factores de seguridad bajos permite anticipar medidas de sostenimiento, monitoreo o rediseño antes de que las labores subterráneas se vean expuestas al riesgo.
2. **Continuidad productiva:** al prever zonas con alta probabilidad de inestabilidad, se evita la interrupción no planificada de las operaciones.
3. **Optimización de recursos:** el uso de herramientas especializadas como Unwedge posibilita focalizar los esfuerzos técnicos y económicos únicamente en zonas que lo requieren, reduciendo la sobre-ingeniería y optimizando la asignación de recursos.

En este sentido, la investigación no solo contribuye a la gestión del riesgo geotécnico en el sector analizado, sino que ofrece un modelo replicable para otras áreas del yacimiento o incluso para otras faenas con características estructurales similares.

1.7 Resumen metodológico

Las etapas metodológicas llevadas a cabo, de manera general, en el presente estudio corresponden a las siguientes:

1. Se determinaron 18 cajas o paredes laterales de excavaciones (entre caserones y pilares), asociadas al acceso principal del sector OS1, como relevantes y estudiables, debido a su importancia en el tránsito y operación.
2. Se realizó un mapeo geológico estructural de toda el área productiva abarcada por el sector OS1, levantándose numerosos datos de actitudes estructurales de diaclasas, y 113 estructuras geológicas entre fallas mayores, fallas menores y diques, las cuales permitieron evaluar su interacción entre sí e identificar las áreas del acceso principal más complejas estructuralmente.
3. Se realizó el análisis de la proyección estereográfica de polos de los datos de diaclasas levantados a través del *software* Dips (Rocscience), logrando determinar la existencia de cuatro principales familias predominantes en el sector.
4. Se evaluaron todas las combinaciones posibles formadoras de cuñas o bloques entre las cuatro principales familias de diaclasas y 41 estructuras geológicas, entre fallas mayores y fallas menores, determinadas como incidentes en el acceso principal del área de interés (ningún dique levantado afecta al acceso de estudio).
5. Se aplicó métodos determinísticos y probabilísticos, fijando $FS < 1.4$ como umbral de riesgo, a través del *software* Unwedge (Rocscience) para identificar la posibilidad de activación de bloques potencialmente inestables.
6. Se generó una sistematización detallada por caja, mediante la organización en *software* Excel, a modo de resumen y presentación de los resultados, la cual comprende tablas, gráficos, dirección de desprendimiento, volumen estimado y probabilidad de activación. Debido a lo anterior, se pudo detectar los puntos del acceso principal del sector OS1 prioritarios para su intervención mediante alertas geotécnicas preventivas.

7. Se realizó la visualización de morfologías reales, tratamiento 3D y comparación de los resultados de cuñas resultantes de las excavaciones en el *software* Vulcan (Maptek), de tal manera de buscar la validación de la simulación los bloques con riesgo de inestabilidad observando si estos ya se han desprendido.

1.8 Limitaciones

Las principales limitaciones del estudio, en general, radican en el empleo de parámetros estructurales y geomecánicos teóricos o bibliográficos, debido a la ausencia de ensayos de mecánica de roca presentes en la compañía, además de asumir, con el fin de establecer el peor de los casos de riesgo, condiciones estructurales extremas, entre otros.

Limitación	Descripción
Modelamiento idealizado de excavaciones	El software Unwedge no permite simular geometrías reales irregulares; se trabaja sobre modelos conceptuales, es decir, diseños originales de excavaciones.
Supuestos estructurales conservadores	Se asume persistencia infinita de las discontinuidades, a modo de simular el peor escenario posible, lo cual sobrestima el riesgo geotécnico.
Exclusión del campo tensional regional	No se considera la influencia de los esfuerzos inducidos por la actividad minera.
Parámetros geomecánicos-estructurales generalizados	Se emplean valores típicos ($\phi = 33^\circ$, $c = 0.05$ MPa) sin ajuste por ensayos específicos.
Dependencia de la calidad de levantamiento en terreno	La precisión del análisis depende de la fidelidad del mapeo estructural previo.

Tabla 1.1. Limitaciones del estudio. Elaboración propia.

Pese a estas limitaciones, el enfoque aplicado asegura un escenario conservador y robusto, brindando una base confiable para la toma de decisiones geotécnicas en la operación minera.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de geomecánica y estabilidad de cajas subterráneas

La geomecánica es una disciplina de la ingeniería que estudia el comportamiento mecánico de los macizos rocosos y su interacción con las obras subterráneas. Su aplicación es importante en el diseño, ejecución y operación segura de excavaciones mineras, ya que esto permite predecir el comportamiento del terreno frente a los esfuerzos inducidos por la excavación, ayuda a identificar posibles zonas de inestabilidad y definir medidas de control estructural adecuadas. La geomecánica estudia el comportamiento mecánico de suelos y rocas, siendo esencial para el diseño y construcción de estructuras seguras en ingeniería civil.

En minería subterránea, las excavaciones modifican significativamente el estado tensional original del macizo rocoso, lo que puede generar deformaciones, la activación de discontinuidades existentes o generación de nuevas fracturas. La estabilidad de una excavación está condicionada por la resistencia del material de sus paredes, la presencia de discontinuidades y las condiciones hidrogeológicas (Mateos et al., 2002).

2.1.1 Estabilidad de excavaciones y mecanismos de falla

Entre los factores de los que depende la estabilidad de una excavación se encuentran las propiedades resistentes de la roca intacta, el estado tensional, las condiciones hidrogeológicas y, muy importante, la configuración estructural del macizo rocoso. Estos elementos pueden dar lugar a diferentes mecanismos de falla. Los modos de falla en minería subterránea están determinados en gran medida por las características geométricas y mecánicas de las discontinuidades presentes en el macizo (Torres et al., 2016).

Los mecanismos de inestabilidad o falla más comunes incluyen el fallamiento planar, el colapso o falla por cuña y el volcamiento o *toppling*. Cada uno de los mecanismos de falla depende del ángulo, persistencia, espaciado y condiciones de relleno de los planos estructurales. Los volcamientos o fallas en cuña son responsables de buena parte de los eventos de caída de roca en labores subterráneas, especialmente cuando las discontinuidades están orientadas hacia el vacío de la excavación (Rodríguez et al., 2017).

La falla planar ocurre cuando una discontinuidad individual se encuentra inclinada hacia la excavación y permite el deslizamiento del bloque, en cambio, la falla por cuña se produce de la intersección de tres o más planos estructurales, generando bloques susceptibles de movimiento si la línea de intersección está dirigida hacia la cara libre de una excavación. Por otro lado, el volcamiento o *toppling* ocurre cuando los bloques se encuentran dispuestos casi de forma vertical y giran hacia el vacío sin necesidad de deslizamiento. Este tipo de mecanismo es común en rocas laminadas o con diaclasas bastante inclinadas, pero debe considerarse especialmente en taludes y cámaras profundas con presencia de estructuras geológicas subverticales (Ramírez et al., 1984).

El presente estudio se centra en el análisis de fallas tipo cuña, dadas las características estructurales del sector OS1, que favorecen este mecanismo, y cuya modelación es posible debido a que se considera la orientación de las discontinuidades y su relación con la geometría del talud o pared de excavación (Romana, 1985).

2.1.2 Parámetros clave para el análisis geomecánico

El análisis de estabilidad de cuñas requiere la integración de parámetros geométricos, estructurales y mecánicos, entre los que destacan:

Parámetro	Descripción
Ángulo de fricción (ϕ)	Capacidad de las superficies para resistir deslizamiento por fricción.
Cohesión (c)	Fuerza interna que mantiene unida la roca sin presión normal.
Factor de seguridad (FS)	Relación entre fuerzas resistentes y fuerzas actuantes. Se considera crítico un FS < 1,4.
Dip/dip direction	Orientación espacial de planos estructurales.
Presión de agua	Aumenta la presión intersticial y reduce la resistencia al corte en discontinuidades.

Tabla 2.1. Parámetros geomecánicos del análisis de estabilidad de taludes y cajas subterráneas. Elaboración propia.

Estos parámetros permiten construir modelos determinísticos (con valores fijos) o probabilísticos (con rangos de incertidumbre), mejorando la precisión de las evaluaciones.

Según Hoek y Bray (1981), la evaluación precisa de los parámetros geomecánicos es esencial para predecir el comportamiento del macizo rocoso y diseñar excavaciones seguras.

2.1.3 Importancia del *back análisis* geomecánico

La caracterización geomecánica previa a la ejecución de excavaciones permite:

1. Predecir zonas con potencial de inestabilidad.
2. Diseñar medidas de sostenimiento adecuadas a cada sector.
3. Evitar accidentes por desprendimientos inesperados.
4. Optimizar la secuencia de avance y uso de recursos.

En contextos como el de S.C.M. Atacama Kozan, donde las estructuras geológicas son complejas y abundantes, este tipo de análisis resulta indispensable no solo para asegurar la estabilidad operativa, sino para planificar una explotación eficiente y sostenible.

2.2 Tipología de discontinuidades: diaclasas y fallas

En geomecánica, las discontinuidades son fracturas o planos de debilidad que afectan la estabilidad del macizo rocoso, las más comunes en minería subterránea son las diaclasas y las fallas, cuya interacción es crucial en la formación de cuñas inestables.

Las diaclasas se definen como fracturas naturales en la roca a lo largo de las cuales no hay un desplazamiento de cizalle medible, pueden reducir en una gran medida la resistencia del macizo y facilitar el desprendimiento de bloques, especialmente cuando se combinan entre sí o con otras estructuras.

Por otro lado, las fallas son fracturas en la corteza terrestre a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable, pueden clasificarse como mayores (de tipo regional) o menores (locales), y están normalmente relacionadas a las zonas de fracturamiento, alteración o relleno. Su impacto estructural es más severo que el de las diaclasas, y muchas veces pueden definir zonas críticas de debilidad dentro del macizo rocoso. Para efectos de este estudio, las fallas a nivel de yacimiento se clasifican de igual manera en fallas mayores (sus persistencias y espesores cruzan excavaciones en más de

un subnivel) y fallas menores (cuyas persistencia y espesor no afectan más que sectores puntuales y locales de las excavaciones).

Característica	Diaclasas	Fallas
Desplazamiento	No	Sí
Continuidad	Limitada	Alta
Formación	Tensiones menores o térmicas	Actividad tectónica
Influencia en estabilidad	Alta (forman cuñas)	Crítica (definen zonas de falla)
Presencia de relleno	Poca o nula	Frecuente (salbanda, óxidos de Fe, etc.)

Tabla 2.2. Comparativa entre propiedades de diaclasas y fallas. Elaboración propia.

2.3 Teoría del análisis cinemático de cuñas

El análisis cinemático de cuñas es una técnica utilizada en geomecánica para evaluar la posibilidad de movimiento de bloques de roca formados por la intersección de planos de discontinuidad, este método permite determinar si una cuña puede desprenderse y también poder predecir la dirección, considerando únicamente una geometría y la orientación de las discontinuidades, sin tener en cuenta las fuerzas actuantes. Según el manual de ingeniería de taludes del instituto geológico y minero de España, el análisis cinemático permite determinar si una determinada combinación de planos de discontinuidad puede dar lugar a un mecanismo de rotura (IGME, 2006).

Una cuña se forma cuando tres o más discontinuidades se intersectan, generando un bloque de roca delimitado por esos planos. El análisis cinemático evalúa si la orientación de esa cuña permite un desplazamiento libre, normalmente hacia el interior de una excavación, condicionado por la pendiente del talud, la orientación de la cuña y la línea de intersección de los planos. Campos et al. (2022) mencionan que el análisis cinemático es fundamental para identificar posibles inestabilidades en taludes rocosos, especialmente aquellas relacionadas con fallas planares, fallas por cuña y volcamiento.

Para que una cuña se desprenda sin deslizamiento (ubicadas en el techo) la vertical trazada desde el vértice de la cuña corta a la caja de la excavación en un punto que cae dentro de la base de cuña. En el caso de que dicho punto se sitúe fuera de la base de la cuña (ubicadas en paredes laterales y techo de excavaciones), esta caerá deslizando sobre uno de sus planos o sobre la línea de intersección entre dos planos. En ambos casos, la proyección estereográfica de la línea vertical que pasa por el vértice de la cuña está representada por el centro de la red (Zelada, 2017).

Desde lo práctico, para que la cuña caiga por gravedad, sin deslizamiento, el área comprendida entre los 3 arcos de círculo máximo que representan los planos estructurales de la cuña en proyección estereográfica, deben incluir el centro de la red (Figura 2.1).

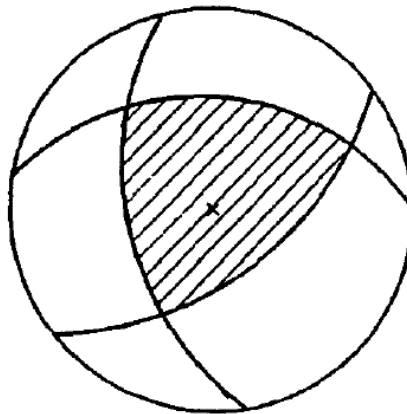


Figura 2.1. Proyección estereográfica de cuña que se desprenderá por gravedad. Extraído de Ramírez et al., 1984.

Cuando no tiene lugar la condición anterior, la cuña podrá caer por gravedad y deslizamiento, por lo menos, sobre uno de sus planos o a lo largo de la línea de intersección de dos planos estructurales. El hecho de que la cuña caiga o no, depende de la inclinación del plano o de la línea de intersección de los planos sobre los que se produce el deslizamiento. Si esta inclinación es mayor que el ángulo de fricción Φ (φ) se producirá la caída de la cuña por deslizamiento (Figura 2.2).

La condición de no deslizamiento en proyección estereográfica queda satisfecha cuando los tres arcos de círculo máximo que representan los planos estructurales de la cuña, caen fuera del círculo o cono de fricción, el cual se obtiene llevando el ángulo Φ

(φ) desde el exterior hacia el centro de la red estereográfica. En este caso la cuña se considera como estable sin posibilidades de desprendimiento (Figura 2.3).

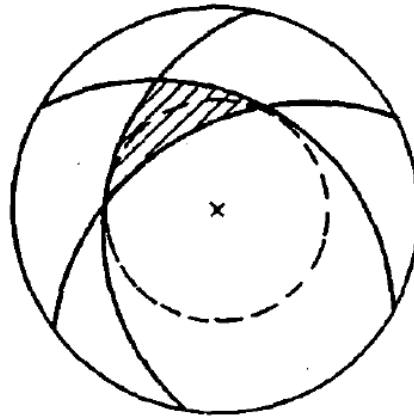


Figura 2.2. Proyección estereográfica de cuña que se desprenderá por deslizamiento. Extraído de Ramírez et al., 1984.

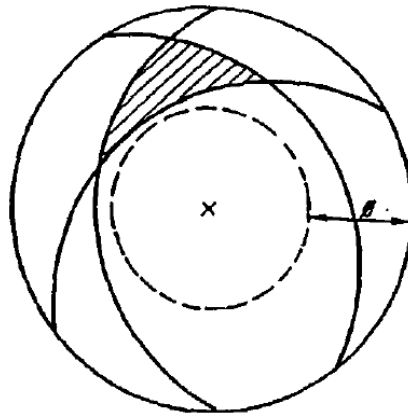


Figura 2.3. Proyección estereográfica de cuña estable que no se desprenderá bajo ningún caso. Extraído de Ramírez et al., 1984.

En resumen, para que una cuña sea cinemáticamente posible, debe cumplir con tres condiciones básicas:

1. La línea de intersección de dos planos debe caer dentro del plano libre (excavación).
2. El ángulo de la cuña debe ser mayor al ángulo de fricción entre los planos.
3. La dirección de posible desprendimiento debe coincidir con el espacio libre de la excavación.

Condición	Descripción
Intersección dentro del talud	La línea de intersección cae dentro de los límites de la excavación.
Ángulo > ángulo de fricción	Si el ángulo formado por los planos es mayor al ángulo de fricción, hay riesgo.
Desplazamiento hacia el vacío	La cuña tiene una dirección libre para deslizarse.

Tabla 2.3. Criterios básicos para evaluar la movilidad de una cuña o bloque. Adaptado del Instituto Geológico y minero de España (IGME), 2006.

Un análisis cinemático complementado con un enfoque numérico y probabilístico, incorporando variables como el factor de seguridad (FS) y la probabilidad de activación, permite una completa y realista del riesgo de desprendimiento.

2.4 Parámetros geotécnicos considerados

Es fundamental la consideración de parámetros geotécnicos que permiten comprender y anticipar el comportamiento mecánico del macizo rocoso, estos parámetros funcionan de base para la formulación de modelos de falla, la simulación numérica de escenarios y el diseño de soluciones de ingeniería que garanticen condiciones operativas seguras. Entre los más relevantes se encuentran aquellos derivados del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb y del Factor de Seguridad (FS), ampliamente utilizados en la práctica geotécnica y minera.

2.4.1 Criterio de Mohr-Coulomb

El modelo de Mohr-Coulomb se basa en la idea de que la resistencia al corte de un material depende de dos factores fundamentales: la cohesión (c) entre partículas y el ángulo de fricción interna (ϕ) que representa la resistencia por fricción entre superficies de deslizamiento. Este criterio puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

Donde:

- τ : Resistencia al corte del material (MPa o kPa).

- σ : Tensión normal actuante sobre el plano (MPa o kPa).
- c : Cohesión del material (MPa o kPa).
- ϕ : Ángulo de fricción interna (°).

Reflejado en terreno, un macizo con alta cohesión resistirá mejor a la formación de fracturas, incluso bajo tensiones elevadas. Si el ángulo de fricción es bajo, bastará con una inclinación moderada del talud para que ocurra un deslizamiento. En cambio, si tanto la cohesión como la fricción son altas, el macizo se comportará de forma estable incluso en geometrías complejas.

Según Hoek y Bray (1981) el criterio de Mohr-Coulomb es útil para estudios preliminares de estabilidad y para proyectos en los que se cuenta con datos limitados sobre las propiedades del macizo rocoso. A pesar de su carácter simplificado, este criterio continúa siendo una herramienta clave en minería y obras civiles subterráneas.

2.4.2 Factor de seguridad (FS)

El Factor de Seguridad (FS) es un índice numérico que permite valorar si una determinada configuración geotécnica es estable bajo las condiciones actuales o proyectadas. Se define como la relación entre la resistencia disponible (fuerzas que resisten el colapso) y las fuerzas actuantes (peso del material, empujes, presión de agua, etc.).

$$FS = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas actuantes}}$$

- Si **FS > 1.5**, se considera que la estructura es estable con un margen de seguridad adecuado.
- Si **FS < 1.0**, existe una condición inestable y de falla inminente.
- Entre **1.0 y 1.3**, la estabilidad es marginal y se requiere intervención correctiva debido a un alto riesgo de falla.
- Entre **1.3 y 1.5**, la estabilidad es aceptable, existencia de un riesgo moderado.

En minería subterránea un $FS = 1.4$ es considerado como un umbral mínimo para considerar que una cuña es estructuralmente estable. Cuñas con $FS < 1.4$, se catalogan como potencialmente inestables y se les asigna una prioridad alta en términos de monitoreo, sostenimiento o rediseño geométrico.

2.5 Factores que afectan la estabilidad de excavaciones subterráneas

Existen muchos factores que influyen directa e indirectamente en la estabilidad de caserones, galerías, cámaras y pilares subterráneos, estos factores pueden ser de naturaleza geológica, estructural, hidrogeológica u operacional.

2.5.1 Factores geológicos y estructurales

Inciden directamente características estructurales del macizo rocoso, particularmente la presencia de discontinuidades tales como fallas, diaclasas y contactos litológicos. La orientación, persistencia, espaciamiento y condiciones de relleno de estas discontinuidades condicionan la forma en que el macizo responde a los esfuerzos inducidos por la excavación.

Numerosos estudios han señalado que cuando no se tiene en cuenta de forma adecuada la disposición de las discontinuidades en el diseño de excavaciones, pueden generarse escenarios críticos de inestabilidad. Dicho esto, y como lo indica, Rodríguez et al. (2017), la formación de cuñas estructurales se ve potenciada cuando los planos de discontinuidad interceptan en dirección hacia la cara libre, lo que incrementa la probabilidad de deslizamiento o caída por acción gravitacional, especialmente en sectores donde la interacción entre los planos geológicos llega a superar la capacidad del sostenimiento instalado.

Adicionalmente, el tipo de roca, su grado de alteración, su resistencia a compresión y su módulo de deformación son parámetros fundamentales para evaluar.

2.5.2 Factores hidrogeológicos y geotécnicos

El agua subterránea es un elemento que altera significativamente la estabilidad de una excavación. El ingreso de agua a través de fracturas puede incrementar la presión

intersticial, disminuir la cohesión efectiva entre bloques, aumentar el peso propio de las masas rocosas, generar procesos de disolución o alteración mineralógica, disminuir la resistencia al corte y aumentar la posibilidad de deslizamiento en excavaciones subterráneas (Corral y Pardo, 2019).

2.5.3 Factores operacionales y de diseño

Es importante velar por la consideración de la geometría de los caserones (altura, ancho, forma de acceso), la secuencia de minado, la presencia o ausencia de sostenimiento adecuado y las vibraciones por tronaduras o maquinaria pesada.

Debido a la toma de decisiones de diseño poco acertadas como un sobredimensionamiento de los túneles, diagramas de perforación excesivos o la tardía instalación de la fortificación, entre otros, es probable que se activen mecanismos de falla progresiva, sobre todo en áreas donde confluyen numerosas estructuras geológicas. Torres et al. (2016) señalan que la interacción entre la geometría de la excavación, la secuencia constructiva y el sostenimiento instalado puede incrementar los esfuerzos locales y reducir los factores de seguridad previstos.

Finalmente, se puede clasificar el nivel de impacto de los distintos factores que afectan la estabilidad de las excavaciones subterráneas de la siguiente manera:

Categoría	Factor específico	Impacto en la estabilidad
Geológica	Tipo de roca, grado de alteración.	Medio a alto
Estructural	Orientación y número de discontinuidades.	Alto
Hidrogeológica	Presencia de agua en fracturas.	Alto
Operacional	Geometría y secuencia de excavación.	Medio a alto
Diseño de sostenimiento	Tipo y calidad del refuerzo aplicado.	Crítico

Tabla 2.4. Clasificación de factores por nivel de impacto. Adaptado de Corral & Prado, 2019.

3 MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

3.1 Geología distrital

Atacama Kozan corresponde a un yacimiento de Óxido Fe/Cu/Au, por lo que el área de estudio comprende parte del cinturón IOCG más joven, ubicado en la Cordillera de la Costa del norte de Chile, formando parte así del arco volcánico Jurásico-Cretácico (Segerstrom y Parker, 1959). Los yacimientos de este estilo muestran relación con complejos plutónicos y sistemas de fallas coetáneos, los complejos más amplios, como lo es el distrito Candelaria-Punta del Cobre, ocurren en secuencias volcánicas-sedimentarias asociadas estrechamente con sistemas de fallas.

Las rocas presentes en el sector de estudio pertenecen tanto a la Formación Punta del Cobre, definida por Segerstrom y Ruiz (1962), como al Grupo Chañarcillo. Este último incluye a las formaciones, definidas por Biese (1942), de base a techo, Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón. En contemporaneidad a estas formaciones, se cuenta con la presencia de rocas volcánicas con intercalación calcáreas pertenecientes a la Formación Bandurrias (Segerstrom, 1960). Estas unidades, se encuentran intruidas por plutones de edad cretácica.

3.1.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano inferior):

Secuencia volcánica-sedimentaria sobre yace a la Formación La Negra y subyace a la Formación Abundancia, ambas de manera concordante. De base a techo, la Formación se subdivide en el Miembro Geraldo-Negro y Miembro Algarrobo (Segerstrom y Ruiz, 1962).

- a) *Miembro Geraldo-Negro*: En términos generales, son rocas volcánicas masivas continentales. De base a techo, (1) Andesitas inferiores: dominado por rocas volcánicas masivas, con variaciones de grano en las Andesitas, intercaladas con capas delgadas de rocas sedimentarias. (2) Dacitas Meléndez: rocas dacíticas con presencia de alteración potásica y albitización.

- b) *Miembro Algarrobo*: Sucesión de conglomerados con presencia de clastos volcánicos gruesos, con mala estratificación, además de brechas de grano fino.

3.1.2 Grupo Chañarcillo: (Cretácico Inferior):

En este grupo se incluyen, de base a techo, las formaciones: Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957). En el distrito Candelaria-Punta del Cobre, sector donde se ubica el área de estudio, solo se han reconocido la presencia de afloramientos pertenecientes a las formaciones Abundancia y Nantoco.

- a) *Formación Abundancia (Valanginiano Superior)*: Secuencia sedimentaria formada por calcilitas y grauvacas verdes, dispuestos en capas continuas, graduando internamente a hacia un techo de calcilitas blanquecinas o desarrollo de laminación muy fina (Arévalo, 2005). La presente Formación está cubierta concordantemente por la Formación Nantoco (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957).
- b) *Formación Nantoco (Hauteriviano)*: Compuesta por un miembro inferior de calcilitas y calcilitas limosas, además de un nivel persistente de calcarenitas bio e intraclásticas; y un miembro superior de calcilitas negras con laminación fina y calcarenitas amarillentas (Arévalo, 2005). Sobreyace a la Formación Abundancia y subyace a la Formación Totoralillo, ambas de manera concordante (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957).

3.1.3 Cuerpos intrusivos:

- a) *Diorita La Brea*: Definido como dioritas y granodioritas con granos gruesos de plagioclasa, presencia de ferromagnesianos. Se encuentran intruyendo a la Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962). Es el cuerpo intrusivo de mayor dimensión de acuerdo con sus afloramientos en el área de Tierra Amarilla.
- b) *Monzodiorita San Gregorio*: Compuesto por monzodioritas homogéneas de hornblenda, biotita y clinopiroxeno, con actinolita y turmalina ocasional, además de plagioclasa, ortoclasa y cuarzo intersticial, los que se disponen como agregados seriados (Arévalo, 2005).

- c) *Granodiorita Los Lirios*: Compuesto granodioritas de biotita y hornblenda, con variaciones a tonalitas y dioritas cuarcíferas de clinopiroxeno, emplazado en las rocas estratificadas de la Formación Punta del Cobre (Arévalo, 1999; 2005).

3.1.4 Rocas metamórficas

El emplazamiento del batolito Copiapó produjo una amplia aureola de contacto (hasta 3.5 km) de skarns de calco-silicatos, rocas corneanas y rocas metavolcánicas (Tilling, 1962). Dentro de la aureola de contacto, las calizas del Grupo Chañarcillo se convirtieron en skarns de granate-escapolita, las que varían a mármol hacia el exterior. Mientras que las rocas tobáceas, volcanoclásticas y calizas, localizadas entre el miembro superior de la Formación Punta del Cobre y la base del Grupo Chañarcillo, se convirtieron en skarns de granate y hornfels (Marschik et al., 2000).

3.2 Geología estructural distrital

En el área correspondiente al distrito Punta del Cobre, los rasgos estructurales más reconocibles, consisten en el Sistema Plegado y Corrido de Paipote (Arévalo et al., 2006), y estructuras subordinadas al Sistema de Falla de Atacama (SFA) que consisten tanto en la zona de cizalle Ojancos-Florida, como en fallas ramificadas del sistema principal (Figura 3.1).

Un rasgo de primer orden en el distrito es el Anticlinorio de Tierra Amarilla que se extiende con rumbo NNE desde el valle del río Copiapó hasta la quebrada Algarrobal (Martínez et al., 2016; Arévalo et al., 2006). Esta estructura se habría generado debido a la presencia de un sistema estructural transcurrente, de tipo flor positiva, denominado “Faja Plegada y Corrida de Paipote”, que se compone de fallas de alto ángulo orientadas ~NNE, con movimiento inverso y componente sinistral, que desplazan y deforman a las rocas de edad Cretácico Inferior; siendo la falla Paipote, la falla maestra desde la que se desprenden el resto de las estructuras y que produce el mayor salto estratigráfico (Arévalo, 1999; 2005).

En relación con las ramificaciones asociadas al Sistema de Falla de Atacama (SFA) dentro de las estructuras mayores reportadas en el distrito, se encuentra la zona de cizalle Ojancos-Florida, donde tal como se describe en Arévalo et al. (2006) corresponde a una zona de cizalla dúctil NNW localizada próxima al contacto entre las rocas intrusivas y secuencias estratificadas del Cretácico inferior. La zona habría sido retrabajada por la falla Paipote, lo que provocó variaciones en la potencia, rumbo y buzamiento.

En el distrito se han reconocido estructuras de rumbo, de componente sinistral y de orientación NW-NNW, que Arévalo et al. (2006) indican como parte de un sistema regional de igual orientación, dentro de las que se han descrito a las fallas Lar, Rocío y Ojancos. La falla Lar corta al distrito Candelaria-Punta del Cobre y en ella se ha observado la presencia de estrías verticales, a pesar del dominio de las estrías horizontales (del Real, 2019).

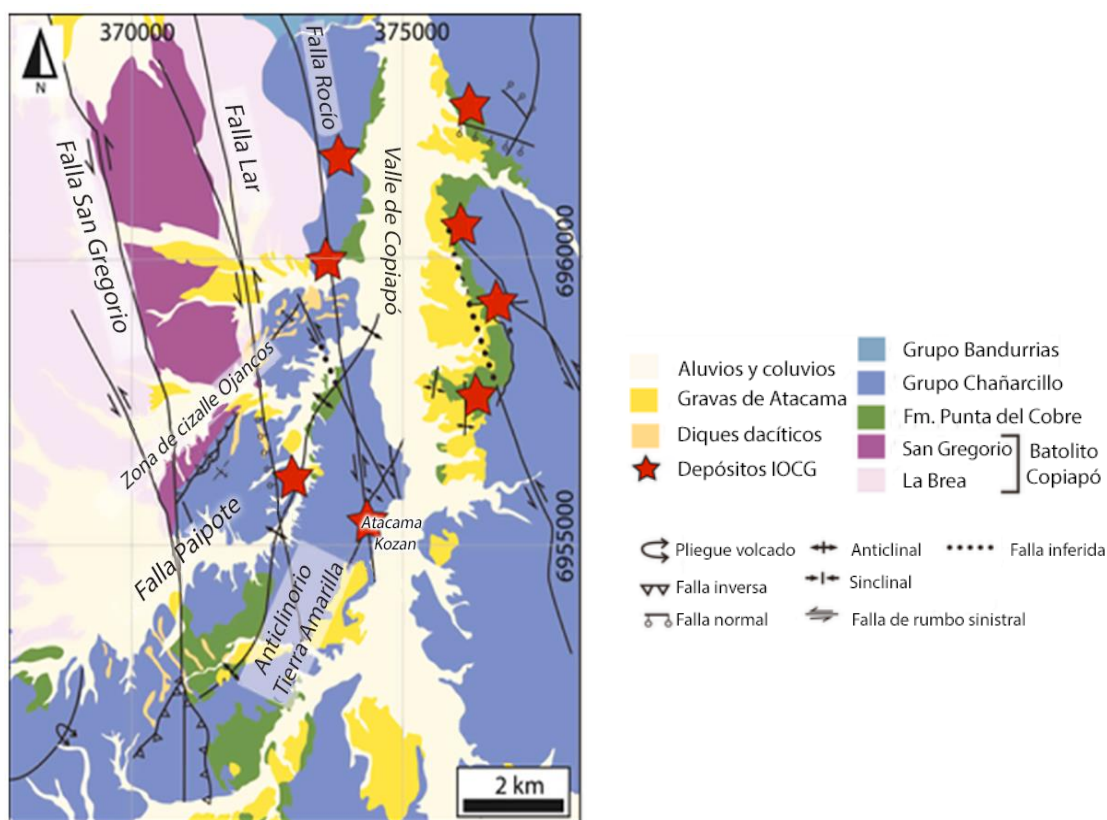


Figura 3.1. Mapa geológico del distrito Candelaria-Punta del Cobre. Modificado de Del Real et al., 2019.

3.3 Geología local de S.C.M. Atacama Kozan

En Atacama Kozan se han definido cuatro unidades geológicas informales (U.G.), las que consisten, desde base a techo, en UG Andesitas, UG de Manto, UG Metasedimentos y UG Tobas, las cuales a superficie son cubiertas por la estratificación de calizas masivas (Figura 3.2).

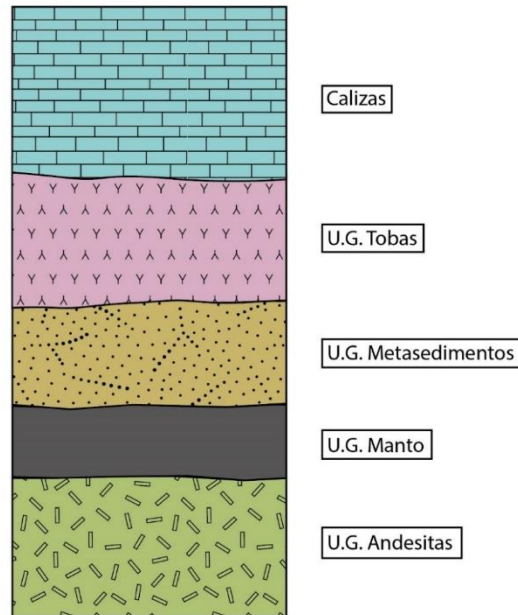


Figura 3.2. Columna estratigráfica del yacimiento Atacama Kozan, indicando unidades geológicas informales. Extraído de Pino, 2025.

1. *UG Andesitas*: Rocas andesíticas porfídicas con fenocristales de plagioclasa, que presentan una intensa alteración potásica, con pirita diseminada o en lentes, y con escasa mineralización de calcopirita. Se dispone subyaciendo a la unidad geológica informal de Manto.
2. *UG Manto*: Unidad de mayor interés económico del yacimiento, por la presencia de calcopirita masiva diseminada. De potencia variable desde 3 a 70 metros, y presenta una mayor potencia y extensión en superficie hacia el sector centro-norte del depósito (Solís, 2016). Consiste en rocas metasedimentarias de color gris oscuro a verdoso, generalmente, con textura obliterada por reemplazo a magnetita, además de presentar alteración a clorita, actinolita, biotita y localmente hematita.

3. *UG Metasedimentos*: Rocas sedimentarias que presentan rasgos de metamorfismo de bajo grado, de color gris oscuro, de grano fino, con una cantidad moderada de micas y sectores con evidencias de estratificación horizontal remanente, a las que se denominado como “Meta-lutitas” (Solís, 2016).
4. *Tobas*: Rocas de tonalidad pardo oscuro, que presentan silicificación y alteración a feldespato potásico, con matriz cinerítica silíceos y andesíticos, en ocasiones, con escaso granate.

3.4 Geología estructural local de S.C.M. Atacama Kozan

En Atacama Kozan se ha establecido unas disposiciones estructurales preferentes, ya que la mayoría de las estructuras geológicas identificadas en el yacimiento cuentan con rumbos principalmente NW, NNW y NNE, con inclinaciones generales de alto ángulo (60-90°). Los trabajos de Solís (2016) y Pérez (2019) validan estas disposiciones, ya que la primera determinó la presencia de dos sets de diaclasas de rumbo NNW y NW, con registros ocasionales de un sistema NNE en varios puntos productivos principales de la mina; mientras que el segundo estableció que, en el costado oeste de la mina, es posible reconocer cuatro sets de diaclasas, de rumbos principales NW, NNW y NNE, con escasos registros de un sistema ~E-W.

La mina Atacama Kozan se encuentra limitada lateralmente por dos VIF principales (fallas mayores a nivel de yacimiento) que se han identificado como de tipo normal, la falla Santa Gemita en el límite occidental y la falla Este hacia el límite oriental (Figura 3.3), ambas con rumbos NW, y buzamientos de 80-90° y 50-55° respectivamente, las que se han definido como estructuras ramificadas del Sistema de Fallas de Atacama (Solís, 2016). La falla Santa Gemita cuenta con un espesor de brecha de falla o relleno de 60 a 120 centímetros, con halos de fracturamiento laterales de hasta 15 metros y rellenos de óxidos de hierro. Por otro lado, la falla Este posee un espesor de 1 a 5 metros, con halos de fracturamiento laterales con elevada alteración argílica de hasta 30 metros.

En el yacimiento, se ha reconocido la distribución de diques de composición gabroica, espesores entre 10 y 50 centímetros, rumbos ~NW y con direcciones de inclinación SW-NE, no observándose mineralización en ellos.

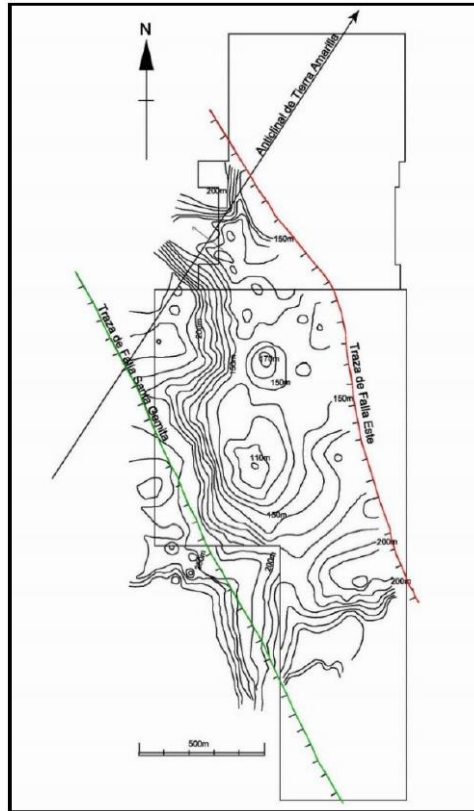


Figura 3.3. Mapa topográfico del yacimiento de Atacama Kozan (no a escala), donde se indica las trazas de la Falla Este (color rojo) y Falla Santa Gemita (color verde). Extraído de Solís, 2016.

Específicamente en el sector OS1 de la mina Atacama Kozan, se observan dos dominios estructurales predominantes, uno NNW-SSE subvertical, y otro NNE-SSW subhorizontal, los cuales se ven reflejados tanto en los fallamientos como en las diaclasas, mostrando una correlación entre ellas. La intersección estructural entre las discontinuidades geológicas es elevada, configurando bloques preformados en las paredes de las excavaciones, independiente de su disposición y pendiente.

3.5 Caracterización geotécnica de S.C.M. Atacama Kozan

En Atacama Kozan se han definido 7 unidades geotécnicas (UGT) las cuales se distribuyen en forma variable a lo largo de la extensión del yacimiento (Figura 3.4). Estas unidades han sido definidas en base al análisis de información histórica obtenida tanto por levantamientos geotécnicos propios de Atacama Kozan, como por instituciones consultoras externas. Una de las características consideradas más relevantes para la definición de las unidades geotécnicas han sido el grado de fracturamiento, o RQD, del

macizo rocoso, ya que, en base a lo observable al interior de la mina, se considera que permite una correcta diferenciación entre calidades de roca presentes en el yacimiento (E-Mining, 2008).

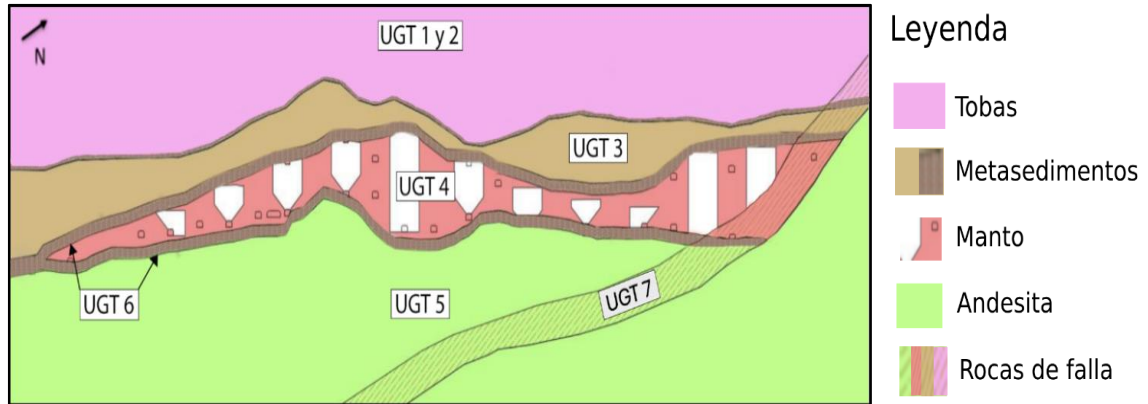


Figura 3.4. Perfil transversal esquemático del yacimiento Atacama Kozan con la distribución relativa de las unidades geotécnicas definidas (no a escala). Extraído de Pino, 2025.

Los atributos geotécnicos de las unidades definidas se señalan de manera resumida en la tabla 3.1.

Característica geotécnica	UGT 1	UGT 2	UGT 3	UGT 4	UGT 5	UGT 6	UGT 7
*UCS	R4-5	R4-5	R3-4	R4-5	R4-5	R3	R1-3
**Alteración	Si y Kfelds	Si y Kfelds	-	Mg y Si	Si y Kfelds	Mg	Total
\bar{x} RMR ₈₉	64	59	62	64	64	55	52
\bar{x} GSI	59	54	57	59	59	49	47
\bar{x} Q de Barton	9.2	5.5	7.7	8.9	9.0	3.3	2.4
\bar{x} Calidad de roca	Buena	Buena a regular	Buena a regular	Buena	Buena	Mala	Mala
Mecanismo de inestabilidad	Intersección estructural	Intersección estructural	Lajas	Intersección estructural	Intersección estructural	Baja cohesión	Elevadas fracturas

Tabla 3.1. Resumen de características geotécnicas asociados a cada UGT definida en Atacama Kozan. Elaboración propia.

*Las clasificaciones asociadas al atributo UCS (resistencia a la compresión uniaxial) son las detalladas en la caracterización geotécnica RMR de Bieniawski (1989) visualizada en el Anexo N°1.

**Las alteraciones de roca señaladas corresponden a: silicificación (Si), feldespato potásico (Kfelds), magnetización (Mg) y obliteración (Total).

4 METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo una metodología de carácter descriptivo y carácter analítico, esta ha sido orientada hacia la evaluación geométrica y estructural del macizo rocoso en el sector OS1 de SCM Atacama Kozan, con el objetivo de detectar configuraciones estructurales desfavorables, conformadas por discontinuidades, que puedan derivar en cuñas con potencial de inestabilidad dentro de las labores subterráneas, integrando tanto parámetros geomecánicos como estructurales.

El procedimiento metodológico incluyó la recopilación, levantamiento, organización y también el análisis de la información estructural disponible, seguida de la clasificación de las cajas objeto de estudio. Posteriormente, se aplicó modelamiento computacional mediante el *software* Unwedge, con el fin de simular el comportamiento de las cuñas generadas. Finalmente, los resultados fueron interpretados bajo criterios técnicos-geotécnicos, incorporando un enfoque probabilístico y el uso de factores de seguridad, lo que permitió delimitar zonas con mayor susceptibilidad a desprendimientos y generar una base técnica sólida para apoyar decisiones de diseño preventivo y planificación operacional.

4.1 Caracterización del sector y selección de cajas a analizar

El presente estudio se llevó a cabo en el sector OS1, de la mina subterránea operada por S.C.M. Atacama Kozan, esta área forma parte de un sistema de explotación subterránea compuesto por caserones, pilares y accesos intermedios que permiten el desarrollo de trabajos de extracción, ventilación y tránsito de maquinaria. Ha sido identificado como una zona geológicamente activa, con alta concentración de estructuras geológicas, lo que motivó la priorización del acceso principal de esta área productiva para el análisis estructural.

Desde el punto de vista geológico, el macizo rocoso en el sector OS1 está compuesto principalmente por rocas andesíticas y metasedimentarias, con presencia de diques, zonas de fallamiento y múltiples familias de diaclasas de distinta orientación, lo cual favorece la formación de bloques preformados. Estas condiciones estructurales, combinadas con la

geometría de las excavaciones, generan un entorno propicio para la activación de mecanismos de falla tipo cuña, que representan un riesgo geotécnico significativo.

Para este análisis, se estudiaron 18 cajas asociadas a distintas excavaciones, denominadas alfabéticamente (desde la caja A hasta la caja R), las cuales corresponden a paredes laterales y verticales de caserones y futuros pilares productivos. La selección se realizó en función de tres criterios fundamentales: la **importancia operativa** (cajas que conforman rutas principales de tránsito, producción o ventilación), la **complejidad estructural** (zonas donde convergen múltiples estructuras geológicas, aumentando la probabilidad de cuñas inestables) y el **historial de intervenciones o reportes de inestabilidad** (sectores donde se han identificado eventos de caída de roca, presencia de fracturas abiertas o señales de deformación), ya que eventualmente podrían significar un riesgo al personal minero o la pérdida del acceso principal utilizado para el tránsito y operación.

Cada una de estas cajas fue evaluada individualmente, identificando las combinaciones de discontinuidades que las atraviesan, su geometría tridimensional y su relación con el diseño topográfico de la excavación. Esta selección permitió enfocar el modelamiento y los análisis posteriores en zonas críticas del acceso principal, asegurando que los resultados obtenidos sean representativos y aplicables directamente en la planificación minera y extractiva del sector.

4.2 Elaboración de modelo estructural conceptual

El modelo estructural conceptual constituye el soporte fundamental del análisis realizado al acceso principal del sector OS1, al reflejar tridimensionalmente la disposición de las discontinuidades geológicas que influyen en la estabilidad de las excavaciones. Su elaboración se basa en la identificación y organización sistemática de las principales estructuras presentes en el macizo rocoso, incluyendo diaclasas, fallas mayores y menores, así como diques, con el fin de reconocer puntos de intersección generadores de cuñas potencialmente inestables.

El mapeo en interior mina consistió en un levantamiento estructural de toda el área abarcada por el sector productivo OS1, realizado mediante brújula del tipo Brunton y

huincha métrica de 100 metros utilizada como método de georeferenciación de la información, al estar amarrada desde el metro cero a un punto topográfico previamente definido y verificado. La actitud de todas las estructuras geológicas mapeadas e involucradas en el presente estudio (diaclasas y fallas) se encuentran en la notación *Dip/Dip direction*.

Se definió como nivel topográfico, para el levantamiento y dibujo de las discontinuidades sobre el plano de terreno y digital, lo que en minería se conoce como “gradiente” de los túneles, lo cual corresponde a una línea horizontal topográfica proyectada a 1.5 metros de altura sobre el piso en las paredes de los túneles, y sobre la cual las estructuras geológicas atraviesan o cortan en un punto topográfico específico cada pared. Estos son utilizados como referenciación para ubicar espacialmente las estructuras mediante la unión de los puntos en ambas cajas del túnel y así poder representarlo de manera gráfica en un plano bidimensional, como se puede observar en la figura 4.1.

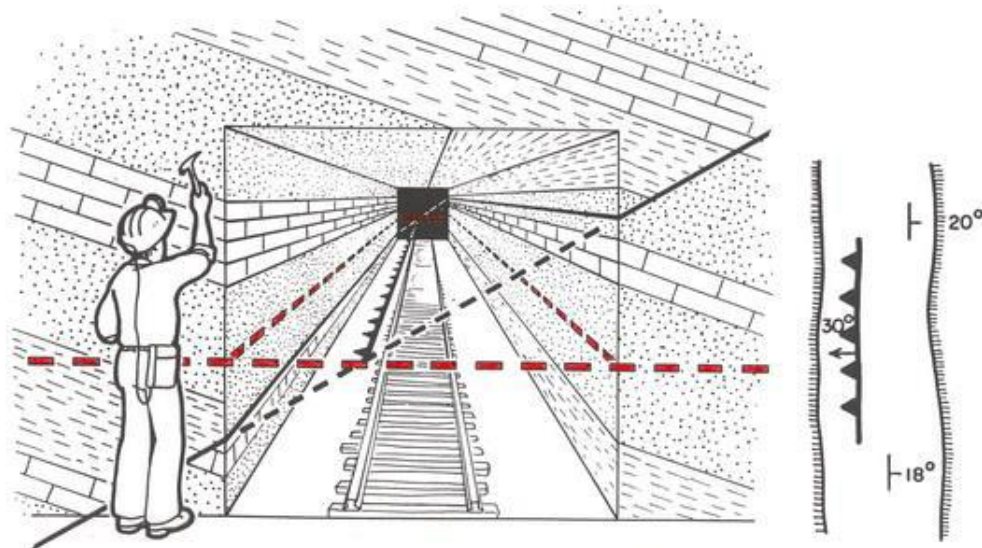


Figura 4.1. Levantamiento y representación estructural mediante referencia de plano teórico a la gradiente de la sección de un túnel. Extraído de Solís, 2016.

El levantamiento estructural contempla la caracterización y registro de fallas mayores (VIF, fallas con una zona de influencia a nivel de sector, con persistencia métricas que atravesaban varias excavaciones y túneles, con espesores de relleno por sobre los 5 cm y que generaban halos de fracturamiento asociados sobre el macizo circundante), fallas

menores (fallas con influencia acotada a una labor o excavación en particular, con persistencias de pocos metros, con espesores de relleno menores a los 5 cm o nulos y que no generaban una perturbación secundaria significativa al macizo rocoso circundante), diaclasas y diques, con su correspondiente ubicación espacial sobre el plano de trabajo. Esta información fue procesada y almacenada en una base de datos Excel y digitalizada en sistemas gráficos mediante el *software* AutoCAD, confeccionándose un plano a escala 1:1500 del sector OS1 en general, y otro a escala 1:1000 enfocado solo a los túneles y paredes laterales de excavaciones y pilares que conforman y se relacionan con el acceso principal de tránsito del sector de estudio, donde se plasman las estructuras geológicas levantadas, su disposición e interacción con las excavaciones existentes y futuras unidades de explotación. Mediante del tratamiento de los datos levantados de diaclasas a través del análisis estereográfico en el *software* Dips, se logró la definición de los cuatro sistemas estructurales representativos en el sector OS1.

Basado en todo lo anterior, para el desarrollo y definición del modelo estructural conceptual se incorporaron los siguientes componentes:

- Cuatro conjuntos de diaclasas con orientaciones y espaciamientos representativos del sector, definidos a partir de datos levantados previamente en terreno y tratados mediante estereografía de polos.
- Un total de 113 fallas clasificadas como mayores (de gran alcance dentro del sector OS1) y menores (de carácter más puntual y local), integradas en un sistema de coordenadas tridimensionales. De estas, solo 41 fallas geológicas inciden en el acceso principal del sector OS1.
- Diques de orientación subvertical que actúan como estructuras rígidas y pueden influir en la configuración de cuñas complejas. Ninguno de los diques identificados y levantados incide en el acceso principal del sector OS1 ni en las paredes laterales de las excavaciones relacionadas.
- Geometría base de las cajas de excavación, según los planos de diseño conceptual entregados por el departamento de planificación mina de S.C.M. Atacama Kozan. Solo 18 cajas de excavación determinadas como relevantes se encuentran relacionadas al acceso principal del sector OS1.

La agrupación y visualización gráfica de toda la información estructural levantada en terreno y de las cuñas que posteriormente se definieron como críticas por el estudio se ve representado en el plano de análisis geométrico-estructural oficial del acceso principal sector OS1, ubicado en la figura 9.2 del Anexo 3. Por otro lado, el levantamiento de todas las estructuras geológicas realizado, y la totalidad de las cajas de excavación definidas como relevantes se encuentra plasmado para su visualización en el plano oficial de análisis geométrico-estructural de todo el sector OS1, ubicado en la figura 9.1 del Anexo 2.

En cuanto al análisis y modelamiento para cada caja de estudio, es importante señalar que, por restricciones del *software* Unwedge, la representación de las excavaciones se realizó mediante geometrías idealizadas (formas rectas y planas), lo cual implica una simplificación del entorno real. Sin embargo, el modelo fue concebido de forma conservadora, buscando capturar las condiciones más críticas posibles.

Por otra parte, en cuanto a lo estructural, el hecho de incluir una o varias fallas mayores o menores en el análisis de cuñas, y su consecuente consideración en las combinaciones formadas, está relacionado a si estas estructuras cortan o atraviesan la caja lateral de la excavación a analizar en específico, independientemente a si estas se interceptan o no entre sí, ya que cada una en particular forma combinaciones con los sets de diaclasas establecidos.

En cuanto a los parámetros geomecánicos, se optó por valores conservadores que representan adecuadamente una roca andesítica alterada, sin recurrir a ensayos específicos, pero en concordancia con los criterios de diseño utilizados previamente en la faena.

En síntesis, la calidad de los datos utilizados permitió construir un modelo estructural robusto y establecer los escenarios geotécnicos bajo los cuales se evaluó la estabilidad de las excavaciones.

4.3 Softwares utilizados y consideraciones de aplicación

Este estudio se apoyó en *softwares* especializados, no solo como soporte gráfico, sino como base técnica esencial para la evaluación de estabilidad estructural. La selección de

herramientas computacionales se realizó con un criterio funcional. Cada programa cumplió un rol específico: desde la construcción geométrica de las excavaciones, pasando por la representación realista de las discontinuidades, hasta la simulación de escenarios de falla en tres dimensiones.

4.3.1 Dips y Unwedge – Rocscience

El *software* Dips corresponde a una herramienta diseñada para el análisis interactivo de datos geológicos basado en sus orientaciones, permitiendo el trazado, análisis y presentación de estos datos utilizando técnicas de proyección estereográfica. Su empleo permitió la definición de dominios estructurales y determinación de las cuatro principales familias de diaclasas existentes en el sector OS1, mediante la representación de todos los datos estructurales y el consecuente análisis estereográfico de concentración de polos. Por otro lado, Dips nos permitió validar el comportamiento cinemático de las cuñas determinadas como poco seguras, al proyectar las discontinuidades que la configuran y comparar la inclinación de los planos de intersección con respecto al ángulo de fricción de estas.

Por otro lado, Unwedge fue el *software* central en el análisis estructural ya que se considera esencial para evaluar combinaciones críticas de planos y estimar el nivel de riesgo asociado en excavaciones subterráneas (Rocscience Inc., 2023). Fue utilizado para simular en 3D los bloques formados por la intersección de las discontinuidades geológicas existentes en cada caja seleccionada del sector de estudio (familias de diaclasas establecidas y las fallas geológicas significativas). Además, el *software* permite incorporar la geometría de cada excavación en particular, junto a parámetros geomecánicos. Unwedge se determinó la posibilidad cinemática de formación de cuñas, la dirección potencial de deslizamiento, el cálculo del factor de seguridad (FS) y la probabilidad de activación considerando variaciones estructurales.

Ya en el detalle, los parámetros y configuraciones de entrada (*Input Data*) utilizados en el *software* Unwedge para el análisis determinístico de cuñas fueron estandarizados para su uso en todas las secciones o cajas analizadas (donde solo cambian las estructuras

geológicas involucradas, y por ende, la cantidad de combinaciones formadas). El *Input Data* utilizado se dispuso con las siguientes consideraciones:

1. Las dimensiones utilizadas para modelar los caserones y pilares correspondieron a las reales de estos, en base a su isométrico de diseño (Figura 4.2).
2. El factor de seguridad de diseño se estableció en 1.4 (Figura 4.2).
3. Las unidades de densidad utilizadas se configuraron en 0.03 MN/m^3 para la roca y 0.00981 MN/m^3 para el agua (Figura 4.2), basado en la información interna de Atacama Kozan con respecto a estudios de densidades de la roca mineralizada (caso del sector OS1) y el agua extraída de afloramientos subterráneos.

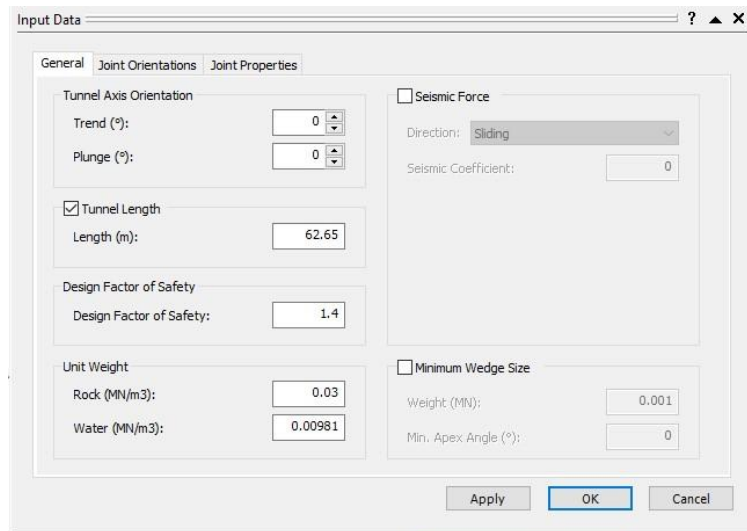


Figura 4.2. Configuración general de los datos de entrada en el software Unwedge. Elaboración propia.

4. No se utilizaron parámetros de dimensionamiento mínimo de cuñas, de tal manera de modelar las dimensiones máximas posibles en base a la configuración aplicada (Figura 4.2).
5. Las propiedades de las discontinuidades se establecieron y asociaron a todas las estructuras geológicas involucradas en el análisis (fallas y diaclasas) por igual. Lo anterior significa que, con respecto a la resistencia al cizalle, todas las discontinuidades analizadas fueron modeladas por el método de Mohr-Coulomb, con un ángulo de fricción estructural (Φ) de 33° , una cohesión de 0.05 MPa y una fuerza de tensión de 0 MPa. En cuanto a la presión de agua se consideró

constante y de una magnitud de 0 MPa debido a que el sector de estudio es seco y no posee humedad, mientras que la continuidad de las todas las estructuras se contempló infinita y con nula ondulación (Figura 4.3).

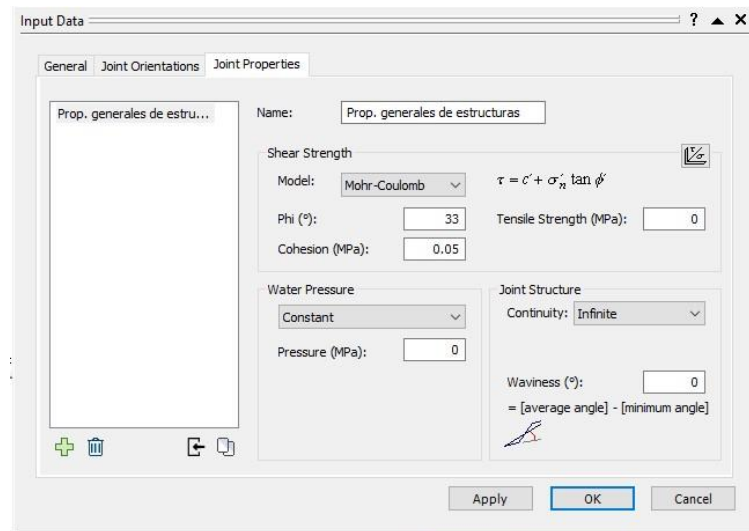


Figura 4.3. Configuración de propiedades asociadas a las discontinuidades en el software Unwedge. Elaboración propia.

Por otro lado, los parámetros y configuraciones de entrada (*Input Data*) utilizados en Unwedge para el análisis probabilístico de cuñas fueron exactamente los mismos estandarizados para el análisis determinístico, realizándose de igual manera a todas las cajas estudiadas. El método de muestreo utilizado para el análisis probabilístico fue el de hipercubo latino (también conocido como LHS) con un número de muestras igual a 500. El parámetro que se determinó mediante el análisis probabilístico de cuñas fue el porcentaje de probabilidad de activación o falla de las cuñas formadas por la combinación de las discontinuidades consideradas.

Con respecto al campo tensional, los modelamientos de cuñas desarrollados para todas las secciones analizadas se consideraron sin la acción de los esfuerzos tensionales previamente identificados y establecidos presentes en la mina Atacama Kozan (Figura 4.4), de tal manera de asumir para estos un estado tensional homogéneo.

El *Input Data* anteriormente descritas se establecieron para modelar el escenario más desfavorable, ya que no se considera la acción del campo tensional y las discontinuidades

combinadas son modeladas con persistencias infinitas (lo cual significa una sobreestimación de volúmenes y tonelajes de los bloques). Debido a lo anterior, se espera que el comportamiento real de las cuñas modeladas sea mucho mejor en términos de seguridad a los resultados obtenidos.

The screenshot shows a 'Field Stress' dialog box with the following configuration:

- Use Stresses in Analysis
- Field Stress Type: Constant
- Sigma 1**
 - Magnitude (MPa, Comp +): 27
 - Trend (°): 330
 - Plunge (°): -10
- Sigma 2**
 - Magnitude (MPa, Comp+): 18
- Sigma 3**
 - Magnitude (MPa, Comp +): 10
 - Trend (°): 240
 - Plunge (°): 0

Buttons at the bottom: Advanced..., Apply, OK, Cancel.

Figura 4.4. Configuración de campo tensional. No se considera dentro de los análisis realizados.
Elaboración propia.

La determinación y uso de los valores del ángulo de fricción y cohesión de las estructuras se realizó en base lo entregado por Flores y Karzulovic (2003) donde se indica que en condiciones de bajo confinamiento y a escalas de 25 a 50 metros, las estructuras selladas con rellenos no arcillosos (caso de las estructuras del sector OS1 de Atacama Kozan) presentan resistencias a cohesiones en el rango de 50 a 150 kPa, y ángulos de fricción en el rango de 25° a 35°. En base a lo anterior, se definió para este estudio valores cercanos a los más desfavorables, es decir, 50 kPa para la cohesión (0.05 MPa) y 33° de Phi (ángulo de fricción). La asignación de estos valores desprendidos de la literatura se debe a la inexistencia de ensayos en laboratorio de fricción y corte de las discontinuidades existentes en Atacama Kozan.

4.3.2 Vulcan – Maptek

Vulcan se utilizó como herramienta de referencia para validar los diseños conceptuales y topográficos de las excavaciones, además de la visualización real de las morfologías actuales de los caserones ya explotados. Permitió comprobar las dimensiones y orientación real de las cajas, exportar geometrías base ajustadas al diseño e integrar estructuras geológicas en entornos CAD tridimensionales.

Esta plataforma fue fundamental para asegurar que los modelos trabajados representaran fielmente el contexto real del sector OS1.

4.3.3 AutoCAD y Excel – Autodesk y Microsoft

AutoCAD facilitó la revisión y creación de los planos estructurales (Anexo 2 y 3), permitiendo el dibujo digital y ubicación espacial de las discontinuidades levantadas en terreno, mientras que Excel se empleó para organizar la base de datos y sistematizar los resultados por caja, tabulando la cantidad y el detalle de combinaciones entre estructuras geológicas y sus características. Ambas herramientas contribuyeron a mantener la trazabilidad y claridad del proceso analítico.

4.4 Criterios para la identificación de cuñas sensibles (FS < 1.4)

Se definió un umbral de seguridad conservador basado en un FS igual a 1.4, criterio ampliamente respaldado por estándares internacionales y prácticas operativas en faenas comparables. Este valor se considera el límite a partir del cual aumenta de manera significativa la probabilidad de movilización, especialmente bajo condiciones adversas como infiltraciones de agua, efectos de tronaduras o cargas adicionales. La utilización de un $FS \geq 1.4$ en excavaciones subterráneas ofrece un balance prudente entre seguridad y viabilidad técnica en la elección de sostenimientos (Hoek y Brown, 1997).

Junto al FS, se tomaron en cuenta para determinar la criticidad de cada cuña parámetros como el **volumen del bloque** (a mayor tamaño = mayor riesgo de daño estructural y operativo), la **dirección de caída**, la **probabilidad de activación** y la **presencia de estructuras relevantes** (aquellas que incluyen fallas mayores en su conformación son evaluadas con mayor rigurosidad).

5 RESULTADOS

5.1 Introducción al desarrollo del estudio

El presente capítulo tiene como propósito analizar en detalle cada una de las cajas estructurales seleccionadas en el sector OS1, abarcando tanto caserones ya explotados como pilares planificados a recuperar. Se evaluarán las condiciones geométrico-estructurales particulares de cada caja, mediante la identificación de cuñas potencialmente inestables formadas por la interacción entre familias de diaclasas representativas, previamente definidas mediante análisis estereográfico de concentración de polos, y fallas mayores o menores.

Los resultados se basan en modelamientos determinísticos y probabilísticos realizados con el *software* Unwedge de Rocscience, considerando un factor de seguridad (FS) límite de 1.4 como criterio para catalogar una cuña como sensible o riesgosa. Lo anterior permitirá identificar zonas prioritarias para aplicar medidas de refuerzo o monitoreo geotécnico, con el fin de prevenir desprendimientos que puedan comprometer la seguridad del personal, la continuidad operacional o la integridad de la infraestructura minera en el sector OS1.

5.2 Determinación de set de diaclasas representativos

El análisis estereográfico mediante concentración de polos realizado de aproximadamente 115 datos estructurales de diaclasas, levantados a través del mapeo estructural realizado en los túneles pertenecientes al sector, permitió definir cuatro familias principales de diaclasado representativas para toda el área de estudio (Figura 5.1).

Debido a la elevada presencia de magnetita en las rocas conformantes del sector OS1, las actitudes estructurales de las familias de diaclasas determinadas mediante estereografía fueron ajustadas para corregir el desvío ocurrido en el levantamiento de terreno por acción de la magnetización, ajustando principalmente el rumbo (y por consiguiente el *Dip Direction*) de los sets más subverticales. La actitud final de los sets ajustados se observa en la tabla 5.1.

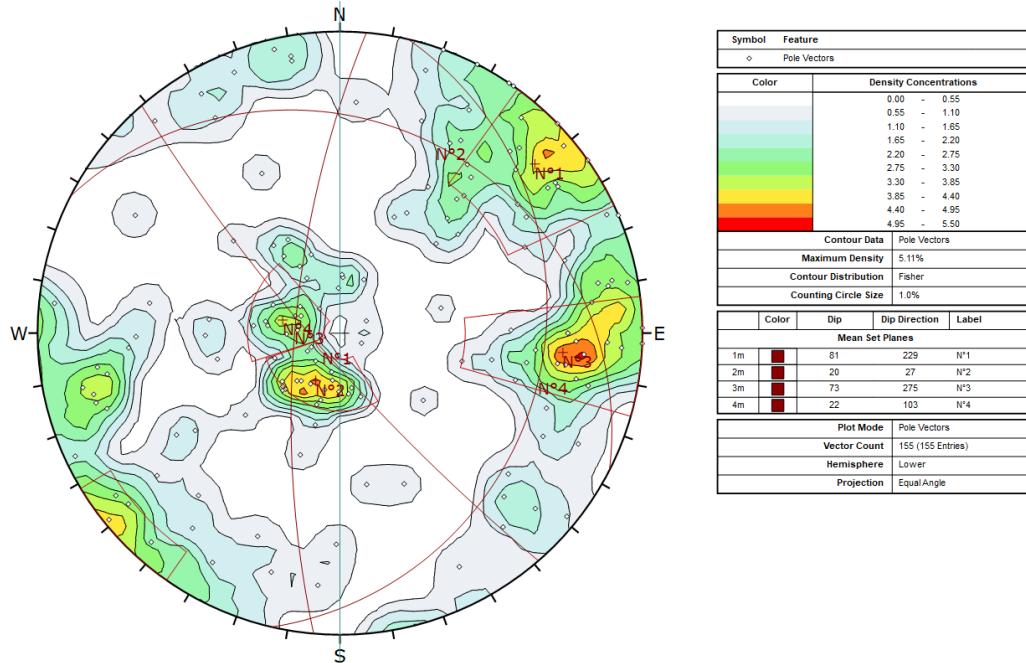


Figura 5.1. Proyección estereográfica y concentración de polos de diaclasas levantadas en el sector OS1.

Familia	Dip	Dip Direction
N° 1	81	279
N° 2	20	26
N° 3	73	304
N° 4	22	103

Tabla 5.1. Familias de diaclasas principales determinadas en el sector OS1.

Estas familias de diaclasas se consideraron como presentes en cada uno de las secciones o cajas a analizar cinemáticamente, y fueron consideradas dentro de las combinaciones de estructuras formadoras de cuñas en conjunto a las fallas mayores y menores existentes en cada sección en particular.

5.3 Análisis cinemático de cuñas por caja de estudio

Las secciones o cajas de estudio corresponden a las paredes laterales de los caserones ya explotados y futuras unidades de producción mediante recuperación de pilares, las cuales se encuentran colindantes e interactúan directamente con los túneles conformantes del acceso principal del sector OS1. Para su identificación individual fueron asignadas

alfabéticamente con letras desde la “A” a la “R”, y su ubicación espacial, además de las estructuras geológicas inciden en cada una en particular, se puede observar en el plano oficial de análisis geométrico estructural enfocado al Acceso principal del sector productivo OS1, del Anexo 5.

Para cada caso, se especifica las estructuras geológicas consideradas para la determinación de las combinaciones de cuñas, además de las características de dimensionamiento de estas y consideraciones asociadas a su posible desprendimiento. Con respecto a la referenciación de las fallas mayores y menores, estas fueron designadas con un número en base al total de fallas levantadas en el sector OS1, por lo que su numeración puede no ser correlativa al orden alfabético de las secciones de estudio.

5.3.1 Caja A

La sección o caja A corresponde a la caja Este del caserón OS1-13 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son especifican en la siguiente tabla:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 62	<i>fm62</i>	50	195
Falla menor 61	<i>fm61</i>	22	15

Tabla 5.2. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja A.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-13, donde todas generan bloques en la caja de interés. Es decir, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 20 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja A. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran a continuación:

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m ³)	Ápice (m)	Tonelaje estimado			Hacia	Trend	Plunge	
A	1	j3	j4	fm62	1,3	12282,31	27,48	36846,92	j3	fm62	Excavación	231	44	9,8
	2	j1	j4	fm61	73,2	1093,57	6,26	3280,71	j1	j4	Excavación	189	2	0,4
	3	j1	j2	j4	71,2	1153,08	6,87	3459,24	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	4	j1	j3	j4	1,4	1237,06	5,28	3711,18		j1	Excavación	279	81	0,0
	5	j1	j2	fm62	1,7	1873,47	6,27	5620,40	j1	fm62	Excavación	200	50	28,8
	6	j2	j3	fm62	1,3	13137,87	27,72	39413,60	j3	fm62	Excavación	231	44	50,6
	7	j1	j3	fm62	0,6	5802,83	35,69	17408,48		j1	Excavación	279	81	73,0
	8	j1	j4	fm62	1,3	3221,92	9,20	9665,77	j1	fm62	Excavación	200	50	63,2
	9	j3	fm62	fm61	1,3	11591,44	26,62	34774,31	j3	fm62	Excavación	231	44	46,6
	10	j1	j2	j3	1,6	812,50	4,09	2437,51		j1	Excavación	279	81	21,8
	11	j1	j3	fm61	1,7	718,85	3,83	2156,55		j1	Excavación	279	81	28,8
	12	j1	fm62	fm61	1,8	1623,39	5,76	4870,16	j1	fm62	Excavación	200	50	48,0
	13	j4	fm62	fm61	3,4E+38	12027,32	51,51	36081,96	Incondicionalmente estable			0,0		
	14	j2	j4	fm62	3,4E+38	11220,88	53,27	33662,64	Incondicionalmente estable			0,0		
	15	j3	j4	fm61	3,4E+38	12192,83	49,64	36578,48	Incondicionalmente estable			0,0		
	16	j2	j3	j4	3,4E+38	11178,61	49,93	33535,83	Incondicionalmente estable			0,0		
	17	j2	j3	fm61	3,4E+38	2994,58	69,82	8983,74	Incondicionalmente estable			0,0		
	18	j1	j2	fm61	3,4E+38	288,68	7,90	866,05	Incondicionalmente estable			0,0		
	19	j2	j4	fm61	3,4E+38	8201,90	222,20	24605,71	Incondicionalmente estable			0,0		
	20	j2	fm62	fm61	3,4E+38	2328,67	54,70	6986,01	Incondicionalmente estable			0,0		

Tabla 5.3. Información de cuñas conformadas en la Caja A.

El análisis determinístico para la Caja A identifica 5 cuñas formadas por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentran bajo el 1.4 de FS, siendo el mínimo FS modelado entre estas de 0.6. La tabla 5.3 indica que para la Caja A las cuñas formadas que están bajo el FS estipulado (resaltadas en rojo) corresponden a las combinaciones 1, 6, 7, 8 y 9. El valor de FS de la mayoría de estas cuñas no es muy lejano al admisible, además de mencionar que los ápices y los volúmenes de estas cuñas son se encuentran sobrestimados por los antecedentes estructurales y de dimensionamiento de entrada, por lo que estas de formarse en la caja estudiada deben haber caído al extraerse el caserón o caerán en conjunto a los eventos de tronadura de los futuros pilares cercanos.

De igual manera se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, incluyendo aquellas con factores de seguridad más bajos. Existe el caso de ocho cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables. La integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de las cuñas riesgosas, el desprendimiento es en dirección a la excavación generada, lo cual no compromete los trabajos operativos a realizarse en el sector. Es importante mencionar que no se realizaran mayores trabajos asociados a esta sección del caserón OS1-13, ya que su consideración

dentro del análisis se debe netamente a la interacción con un acceso principal externo perteneciente al nivel 165 de la mina Atacama Kozan.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja A demuestra que las combinaciones de cuñas identificadas con FS bajo 1.4 son las que poseen mayor probabilidad de desprendimiento, entre un 9.8% a un 73,0%. Mientras que el resto de las 15 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.2 Caja B

La sección o caja B corresponde a la caja Sur del caserón OS1-13 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 1	<i>fm1</i>	68	89

Tabla 5.4. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja B.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 10 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-13, donde todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra manera, de las 10 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 10 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja B. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.5.

El análisis determinístico para la Caja B no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 2.3. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunje hacia el interior de la excavación, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida.

El análisis probabilístico para la Caja B demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 1.3% el mayor porcentaje de activación determinado para una cuña modelada con FS = 2.7 en esta caja en particular.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Tonelaje estimado	Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m ³)	Ápice (m)				Hacia	Trend	Plunge	
B	1	j1	j2	j3	2,3	1345,73	20,64	4037,18	j1	j3	Excavación	347	67	0,7
	2	j1	j3	j4	2,4	1135,83	17,78	3407,48	j1	j3	Excavación	347	67	1,3
	3	j1	j3	fm1	2,4	1222,05	21,74	3666,16	j1	j3	Excavación	347	67	1,2
	4	j2	j3	fm1	2,7	4267,22	49,94	12801,67	j3	fm1	Excavación	19	40	1,3
	5	j3	j4	fm1	2,7	2433,20	29,29	7299,61	j3	fm1	Excavación	19	40	1,1
	6	j1	j2	fm1	3,6	117057,44	1033,02	351172,33	j2	fm1	Excavación	7	19	1,0
	7	j2	j4	fm1	5,1	151,65	10,81	454,95	j2		Excavación	26	20	0,0
	8	j1	j2	j4	5,2	178,96	11,89	536,87	j2		Excavación	26	20	0,0
	9	j2	j3	j4	6,3	228,60	15,84	685,79	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	10	j1	j4	fm1	9,3	9296,53	88,05	27889,60	j1	fm1	Excavación	6	17	0,0

Tabla 5.5. Información de cuñas conformadas en la Caja B.

5.3.3 Caja C

La sección o caja C corresponde a la caja Sur del caserón OS1-8 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla mayor 2	<i>FM2</i>	14	41
Falla menor 4	<i>fm4</i>	39	309
Falla menor 5	<i>fm5</i>	87	96

Tabla 5.6. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja C.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-8, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Por lo tanto, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 25 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja C. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran a continuación:

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			FS	Dimensionamiento			Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
						Volumen estimado (m ³)	Ápice (m)	Tonelaje estimado		Hacia	Trend	Plunge	
C	1	j1	j2	j4	4,5	389,16	15,25	1167,47	j2	Excavación	26	20	0,0
	2	j1	j4	FM2	6,3	597,53	23,75	1792,58	FM2	Excavación	41	14	0,0
	3	j1	j3	j4	2,7	605,11	14,03	1815,32	j1 j3	Excavación	347	67	2,8
	4	j4	fm4	fm5	3,8	5208,89	51,30	15626,67	fm4 fm5	Excavación	7	23	0,0
	5	j3	j4	fm4	10,6	44552,96	566,60	133658,89	j3 j4	Excavación	32	7	0,0
	6	j1	j4	fm5	29,7	5807,70	124,98	17423,09	j1 fm5	Excavación	7	14	0,0
	7	j2	j4	fm4	3,9	534,24	17,66	1602,73	j2	Excavación	26	20	0,0
	8	j4	FM2	fm4	6,1	799,00	32,39	2397,00	FM2	Excavación	41	14	0,0
	9	j3	j4	fm5	2,6	2152,70	25,94	6458,10	j3 fm5	Excavación	10	53	0,4
	10	j4	FM2	fm5	6,4	522,12	22,23	1566,37	FM2	Excavación	41	15	0,0
	11	j2	j4	fm5	4,5	347,33	14,57	1041,99	j2	Excavación	26	20	0,6
	12	j1	j4	fm4	4,1	5142,36	51,82	15427,07	j1 fm4	Excavación	5	24	0,0
	13	j1	j3	fm4	2,7	738,39	16,47	2215,16	j1 j3	Excavación	347	67	0,8
	14	j3	fm4	fm5	2,7	2500,40	31,48	7501,19	j3 fm5	Excavación	10	53	0,8
	15	j3	FM2	fm4	5,1	7688,61	115,45	23065,84	j3 FM2	Excavación	30	14	0,2
	16	j2	j3	fm4	2,5	4333,76	64,89	13001,29	j2	Excavación	26	20	0,6
	21	j1	j3	fm5	2,6	1954,56	28,69	5863,68	j1 j3	Excavación	347	67	10,8
	23	FM2	fm4	fm5	4,0	7742,88	91,50	23228,65	fm4 fm5	Excavación	7	23	0,0
	24	j2	fm4	fm5	4,0	21054,17	257,21	63162,52	fm4 fm5	Excavación	7	23	0,2
	25	j1	j2	fm5	4,0	47498,86	543,87	142496,59	j2 fm5	Excavación	7	19	1,6
	26	j1	FM2	fm4	4,2	6564,28	83,81	19692,85	j1 fm4	Excavación	5	24	0,2
	27	j1	j2	fm4	4,3	14209,11	188,34	42627,34	j1 fm4	Excavación	5	24	0,2
	28	j1	fm4	fm5	4,6	20600,76	256,93	61802,29	j1 fm4	Excavación	5	24	1,6
	29	j3	j4	FM2	6,0	1104,22	41,49	3312,66	FM2	Excavación	41	14	0,0
	35	j1	FM2	fm5	28,4	88200,92	1118,74	264602,76	j1 fm5	Excavación	7	14	0,2

Tabla 5.7. Información de cuñas conformadas en la Caja C.

El análisis determinístico para la Caja C no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 2.5. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encuentra en la misma cota que la base de la excavación OS1-8, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja C demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 10.8% el mayor porcentaje de activación determinado para una cuña modelada con FS = 2.6 en esta caja en particular.

5.3.4 Caja D

La sección o caja D corresponde a la futura caja Sur del pilar planificado a recuperar denominado OS1-H (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 6	<i>fm6</i>	82	236

Tabla 5.8. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja D.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 10 combinaciones en la formación de cuñas en la futura excavación del pilar OS1-H, donde todas generan bloques en la caja de interés, es decir, de las 10 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 10 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja D. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran a continuación:

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Tonelaje estimado	Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)	
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)			Hacia	Trend	Plunge		
D	1	j3	j4	fm6	1,6	60,73	3,39	182,20	j3	Excavación	304	73	10,4	
	2	j1	j3	fm6	1,6	0,21	0,25	0,63	j3	Excavación	304	73	5,4	
	3	j2	j3	fm6	1,6	68,52	3,67	205,56	j3	Excavación	304	73	11,2	
	4	j1	j2	j3	3,5	220,61	11,30	661,83	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	5	j1	j3	j4	3,5	180,14	9,62	540,42	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	6	j1	j2	j4	5,0	216,97	12,68	650,90	j2	Excavación	26	20	0,0	
	7	j2	j4	fm6	5,0	145,93	8,54	437,79	j2	Excavación	26	20	0,0	
	8	j2	j3	j4	6,0	276,68	16,88	830,05	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	9	j1	j2	fm6	74,7	0,23	0,26	0,70	j1	j2	Excavación	6	19	0,0
	10	j1	j4	fm6	3,4E+38	0,23	0,27	0,70	Incondicionalmente estable			0,0		

Tabla 5.9. Información de cuñas conformadas en la Caja D.

El análisis determinístico para la Caja D no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 1.6. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la

excavación, resaltando el caso de una cuña modelada cuyo FS es tan elevado que se considera incondicionalmente estable, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encontrará en la misma cota base de la futura excavación OS1-H, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja D demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 11.2% el mayor porcentaje de activación determinado para una cuña modelada con FS = 1.6 en esta caja en particular.

5.3.5 Caja E

La sección o caja E corresponde a la caja Sur del caserón OS1-7 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas se muestran a continuación:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 7	<i>fm7</i>	74	201
Falla menor 9	<i>fm9</i>	74	270
Falla menor 11	<i>Fm11</i>	61	154

Tabla 5.10. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja E.

Por otro lado, la interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-7, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Por lo tanto, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 29 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja E. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se observan en la tabla 5.9.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado			Hacia	Trend	Plunge	
E	1	j3	j4	fm7	16,3	47,79	1,96	143,37	j3	j4	Excavación	32	7	8,4
	2	j2	j3	fm7	2,4	49,17	1,92	147,52	j2		Excavación	26	20	14,2
	3	j3	j4	fm9	2,5	45,72	4,13	137,17	j3		Excavación	304	73	4,8
	4	j1	j3	j4	3,2	234,62	10,94	703,85	j1	j3	Excavación	347	67	4,6
	5	j1	j2	fm7	4,1	193,20	4,17	579,60	j1	j2	Excavación	6	19	3,0
	6	j1	j2	j4	4,5	366,93	15,32	1100,78	j2		Excavación	26	20	1,0
	7	j2	j4	fm9	4,5	320,59	13,72	961,78	j2		Excavación	26	20	0,4
	8	j3	j4	fm11	6,9	349,98	8,37	1049,94	j4	fm11	Excavación	75	20	0,0
	9	j2	fm9	fm11	2,8	503,59	8,18	1510,76	j2		Excavación	26	20	0,4
	10	j1	j4	fm7	3,4E+38	453,71	5,54	1361,14	Incondicionalmente estable			1,0		
	11	j1	j4	fm11	6,8	328,98	7,27	986,93	j4	fm11	Excavación	75	20	0,0
	12	j1	j2	fm11	2,8	574,26	8,72	1722,77	j2		Excavación	26	20	0,4
	13	j2	fm7	fm11	3,0	233,47	4,53	700,40	j2		Excavación	26	20	0,2
	14	j2	j3	fm11	3,6	590,61	10,18	1771,84	j2	j3	Excavación	28	20	0,4
	15	j4	fm9	fm11	6,9	303,09	6,99	909,28	j4	fm11	Excavación	75	20	0,0
	16	j4	fm7	fm9	3,4E+38	2367,48	8,94	7102,43	Incondicionalmente estable			0,6		
	17	j4	fm7	fm11	7,1	173,70	4,46	521,10	j4	fm11	Excavación	75	20	0,0
	19	j3	fm7	fm11	3,4E+38	936,90	17,55	2810,69	fm7		Excavación	205	74	8,4
	20	j3	fm9	fm11	2,5	35,96	3,37	107,88	j3		Excavación	304	73	1,8
	21	j2	fm7	fm9	5,0	123,57	3,43	370,71	j2	fm9	Excavación	355	17	3,2
	22	j1	j3	fm11	3,3	133,35	6,73	400,06	j1	j3	Excavación	347	67	0,4
	24	j1	fm7	fm11	3,4E+38	3558,11	42,74	10674,32	Incondicionalmente estable			1,0		
	28	j1	j3	fm9	3,7	19,85	3,41	59,55	j1		Excavación	7	10	15,0
	29	j2	j4	fm7	4,7	127,07	5,83	381,21	j2		Excavación	26	20	0,0
	30	j1	j3	fm7	4,2	20,92	1,68	62,75	j1	j3	Excavación	347	67	9,8
	32	j1	j2	fm9	8,3	168,60	14,56	505,80	j1	j2	Excavación	343	46	5,2
	33	j1	j4	fm9	3,4E+38	489,41	20,85	1468,24	Incondicionalmente estable			0,4		
	34	j1	fm7	fm9	3,4E+38	34171,59	159,67	102514,78	Incondicionalmente estable			1,8		
	35	j1	fm9	fm11	3,4E+38	672350,12	3004,25	2017050,36	Incondicionalmente estable			0,0		

Tabla 5.11. Información de cuñas conformadas en la Caja E.

El análisis determinístico para la Caja e no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 2.4. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, resaltando el caso de siete cuñas modeladas dentro de las totales cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encuentra en la misma cota que la base de la excavación OS1-7, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja D demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 15% el mayor porcentaje de activación determinado para una cuña modelada con FS = 3.7 en esta caja en particular.

5.3.6 Caja F

La sección o caja F corresponde a la futura caja Sur del pilar planificado a recuperar denominado OS1-F (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 7	<i>fm7</i>	74	201
Falla menor 12	<i>fm12</i>	55	223

Tabla 5.12. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja F.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la futura excavación del pilar OS1-F, donde todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra manera, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 20 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja E. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.11.

El análisis determinístico para la Caja F no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 2.6. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunje hacia el interior de la excavación, resaltando el caso de dos cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encontrará en la misma cota base de la futura excavación OS1-F, por lo

que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado			Hacia	Trend	Plunge	
F	1	j1	j3	fm12	4,2	53,10	4,24	159,29	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	2	j1	j4	fm9	3,4E+38	145,39	4,51	436,16	Incondicionalmente estable			0,0		
	3	j3	j4	fm12	13,5	203,85	6,61	611,56	j3	j4	Excavación	32	7	0,0
	4	j1	j2	fm9	4,5	117,81	3,82	353,43	j1	j2	Excavación	6	19	0,0
	5	j2	j3	fm12	2,7	150,00	5,43	450,01	j2		Excavación	26	20	0,0
	6	j3	j4	fm9	14,7	69,51	2,64	208,54	j3	j4	Excavación	32	7	2,4
	7	j1	j4	fm12	3,4E+38	462,27	12,96	1386,82	Incondicionalmente estable			0,0		
	8	j1	j2	fm12	4,4	306,49	9,18	919,48	j1	j2	Excavación	6	19	0,0
	9	j2	j3	fm9	2,6	57,88	2,37	173,63	j2		Excavación	26	20	2,4
	10	j1	j3	fm9	4,4	24,02	2,16	72,06	j1	j3	Excavación	347	67	1,2
	11	j1	j2	j3	3,7	165,64	10,27	496,91	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	12	j1	j3	j4	3,8	135,20	8,75	405,59	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	13	j1	j2	j4	5,2	178,98	11,89	536,95	j2		Excavación	26	20	0,0
	14	j1	fm9	fm12	13,7	14,31	1,61	42,92	fm9	fm12	Excavación	277	40	0,0
	15	j2	j4	fm9	5,7	61,84	4,62	185,53	j2		Excavación	26	20	0,0
	16	j2	j4	fm12	5,8	86,36	6,68	259,08	j2		Excavación	26	20	0,0
	17	j3	fm9	fm12	14,7	9,80	1,24	29,39	fm9	fm12	Excavación	277	40	0,0
	18	j4	j3	j4	6,3	228,60	15,84	685,81	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	19	j4	fm9	fm12	13,3	18,50	2,08	55,51	fm9	fm12	Excavación	277	40	0,0
	20	j2	fm9	fm12	13,3	19,89	2,26	59,66	fm9	fm12	Excavación	277	40	0,0

Tabla 5.13. Información de cuñas conformadas en la Caja F.

El análisis probabilístico para la Caja F demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 2.4% el mayor porcentaje de activación determinado para dos cuñas modeladas con FS de 14.7 y 2.6 respectivamente, para esta caja en particular.

5.3.7 Caja G

La sección o caja G corresponde a la caja Sur del caserón OS1-6 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla mayor 21	<i>FM21</i>	28	50
Falla menor 22	<i>fm22</i>	82	235

Tabla 5.14. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja G.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-6, donde todas generan bloques en la caja de interés. Por lo tanto, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 20 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja G. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran a continuación:

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)		
		FS	Volumen estimado (m ³)	Ápice (m)	Tonelaje estimado	Hacia	Trend		Plunge					
G	1	j2	j3	fm22	2,191	22,30	2,48	66,91	j3	Excavación	304	73	0,0	
	2	j3	FM21	fm22	2,191	20,90	2,43	62,69	j3	Excavación	304	73	0,0	
	3	j3	j4	fm22	2,191	19,81	2,29	59,42	j3	Excavación	304	73	0,0	
	4	j1	j3	fm22	2,192	0,10	0,20	0,30	j3	Excavación	304	73	0,0	
	5	j2	j3	FM21	4,303	901,45	41,21	2704,35	j3	FM21	Excavación	25	26	0,0
	6	j1	j2	j3	4,563	74,57	7,87	223,72	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	7	j1	j3	j4	4,634	60,92	6,71	182,76	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	8	j1	j3	FM21	4,638	72,61	8,01	217,82	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	9	j2	j4	FM21	4,764	0,71	0,67	2,13	j2	Excavación	26	20	0,0	
	10	j1	j2	j4	4,842	255,75	13,39	767,24	j2	Excavación	26	20	0,0	
	11	j2	j4	fm22	4,848	170,49	8,94	511,48	j2	Excavación	26	20	0,0	
	12	j1	j2	FM21	5,702	2955,37	141,27	8866,10	j1	FM21	Excavación	6	21	0,0
	13	j2	j3	j4	5,728	338,17	18,05	1014,52	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	14	j2	FM21	fm22	11,857	653,14	33,00	1959,41	j2	FM21	Excavación	357	18	0,0
	15	j1	j2	fm22	87,432	0,11	0,22	0,34	j1	j2	Excavación	6	19	0,0
	16	j1	FM21	fm22	80,276	0,11	0,22	0,34	j1	FM21	Excavación	6	21	0,0
	17	j1	j4	fm22	3,40E+38	0,11	0,22	0,34	Incondicionalmente estable			0,0		
	18	j3	j4	FM21	45,086	0,76	0,69	2,29	j3	FM21	Excavación	25	26	0,0
	19	j1	j4	FM21	55,755	0,77	0,69	2,31	j1	FM21	Excavación	6	21	0,0
	20	j4	FM21	fm22	464,658	0,79	0,71	2,37	FM21	fm22	Excavación	325	2	0,0

Tabla 5.15. Información de cuñas conformadas en la Caja G.

El análisis determinístico para la Caja G no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 2.2. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, resaltando el caso de una cuña modelada cuyo FS es tan elevado que se considera incondicionalmente estable, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encuentra en la misma cota base de la excavación OS1-6, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja G demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo para esta caja en particular 0% el porcentaje de activación determinado para todas las cuñas modeladas independientemente del valor de su FS.

5.3.8 Caja H

La sección o caja H corresponde a la futura caja Este del pilar planificado a recuperar denominado OS1-C (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son especifican en la siguiente tabla:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla mayor 66	<i>FM66</i>	29	149
Falla mayor 69	<i>FM69</i>	54	350

Tabla 5.16. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja H.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la futura excavación del pilar OS1-C, donde todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra manera, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 20 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja H. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.15.

El análisis determinístico para la Caja H no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 1.7. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunje hacia el interior de la excavación, resaltando el caso de siete cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal

del sector OS1 se encontrará en la misma cota base de la futura excavación OS1-C, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja H demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 1% el mayor porcentaje de activación determinado para dos cuñas modeladas con FS de 8.1 y 4.5 respectivamente, para esta caja en particular.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)		
					FS	Volumen estimado (m ³)	Ápice (m)		Tonelaje estimado	Hacia	Trend		Plunge	
H	1	j1	j3	FM69	1,7	24,37	1,15	73,11	j3	Excavación	304	73	0,2	
	2	j1	j3	FM66	2,5	158,88	2,88	476,65	j1	Excavación	279	81	0,6	
	3	j1	j2	FM69	5,6	23,40	0,96	70,21	j1	Excavación	279	81	0,2	
	4	j1	j2	j3	3,6	68,66	1,80	205,98	j1	Excavación	279	81	0,2	
	5	j1	j3	j4	2,9	117,66	2,41	352,99	j1	Excavación	279	81	0,0	
	6	j3	j4	FM66	9,3	441,44	13,19	1324,32	j3	FM66	Excavación	218	11	0,0
	7	j4	FM66	FM69	3,4E+38	1105,70	34,84	3317,11	Incondicionalmente estable			0,0		
	8	j1	j2	FM66	8,1	98,85	2,62	296,54	j1	FM66	Excavación	193	22	1,0
	9	j1	j4	FM66	6,9	115,37	3,90	346,10	j1	FM66	Excavación	193	22	0,0
	10	j3	j4	FM69	3,4E+38	179,31	5,09	537,92	Incondicionalmente estable			0,0		
	11	j2	j3	FM69	3,4E+38	169,98	5,13	509,94	Incondicionalmente estable			0,0		
	12	j3	FM66	FM69	13,1	156,34	4,68	469,01	j3	FM66	Excavación	218	11	0,0
	13	j1	j2	j4	126,8	73,02	2,74	219,07	j1	j4	Excavación	189	2	0,2
	14	j2	j3	FM66	8,3	774,81	14,24	2324,42	j3	FM66	Excavación	218	11	0,0
	15	j2	j4	FM66	3,4E+38	622,62	29,75	1867,86	Incondicionalmente estable			0,0		
	16	j1	FM66	FM69	4,5	36,42	1,20	109,27	j1	Excavación	279	81	1,0	
	17	j1	j4	FM69	4,8	31,46	1,11	94,37	j1	Excavación	279	81	0,2	
	18	j2	j4	FM69	3,4E+38	4480,63	144,87	13441,88	Incondicionalmente estable			0,0		
	19	j2	j3	j4	3,4E+38	629,50	18,49	1888,51	Incondicionalmente estable			0,0		
	20	j2	FM66	FM69	3,4E+38	5081,43	108,36	15244,28	Incondicionalmente estable			0,0		

Tabla 5.17. Información de cuñas conformadas en la Caja H.

5.3.9 Caja I

La sección o caja I corresponde a la futura caja Sur-Central del pilar planificado a recuperar denominado OS1-C (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son especifican en la tabla 5.18.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la futura excavación del pilar OS1-C, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra manera, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 34 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja I. Las características de las cuñas formadas por las

respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.19.

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	j1	81	279
Diaclasas 2	j2	20	26
Diaclasas 3	j3	73	304
Diaclasas 4	j4	22	103
Falla mayor 65	FM65	77	281
Falla menor 68	fm68	78	37
Falla mayor 66	FM66	29	149

Tabla 5.18. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja I.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado			Hacia	Trend	Plunge	
I	1	j1	fm68	FM66	1,4	645,19	8,43	1935,56	j1	fm68	Excavación	343	70	29,0
	2	j3	fm68	FM66	1,1	884,26	8,69	2652,77	j3	fm68	Excavación	341	69	87,8
	3	FM65	fm68	FM66	1,4	784,93	9,14	2354,79	FM65	fm68	Excavación	338	67	39,8
	4	j3	j4	fm68	1,1	873,14	9,30	2619,43	j3	fm68	Excavación	341	69	84,0
	5	j2	j3	fm68	1,1	1434,57	12,61	4303,71	j3	fm68	Excavación	341	69	93,6
	6	j1	j4	fm68	1,4	647,99	8,99	1943,98	j1	fm68	Excavación	343	70	20,6
	7	j4	FM65	fm68	1,4	787,27	9,81	2361,81	FM65	fm68	Excavación	338	67	27,6
	8	j1	j2	fm68	1,3	1071,33	12,38	3213,99	j1	fm68	Excavación	343	70	47,6
	9	j2	FM65	fm68	1,3	1320,65	13,73	3961,95	FM65	fm68	Excavación	338	67	54,0
	10	j1	j2	FM66	6,4	65,85	4,34	197,55	j2		Excavación	26	20	0,0
	11	j2	FM65	FM66	6,4	65,38	4,35	196,15	j2		Excavación	26	20	0,0
	12	j2	j3	FM66	7,2	68,92	4,66	206,75	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	13	j3	j4	FM66	22,6	78,71	6,22	236,12	j3	j4	Excavación	32	7	0,0
	14	j1	j2	j4	4,3	442,97	16,10	1328,92	j2		Excavación	26	20	0,0
	15	j1	j3	j4	2,9	434,90	12,96	1304,70	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	16	j2	j4	FM65	4,4	438,61	16,20	1315,83	j2		Excavación	26	20	0,0
	17	j3	j4	FM65	3,5	200,90	9,04	602,70	j3	FM65	Excavación	327	72	0,4
	18	j3	FM65	FM66	3,4	183,62	8,17	550,86	j3	FM65	Excavación	327	72	0,4
	19	j1	j3	FM66	2,9	383,60	11,22	1150,81	j1	j3	Excavación	347	67	0,0
	20	j1	j3	fm68	1,1	30328,84	547,65	90986,53	j1	fm68	Excavación	343	70	54,8
	21	j2	j3	FM65	2,7	422,43	13,65	1267,29	j3	FM65	Excavación	327	72	5,0
	22	j1	j2	j3	2,5	875,11	19,60	2625,32	j1	j3	Excavación	347	67	3,4
	23	j2	fm68	FM66	6,3	49,82	3,38	149,47	j2		Excavación	26	20	0,0
	24	j3	FM65	fm68	1,7	12805,22	270,10	38415,67	j3	FM65	Excavación	327	72	47,0
	25	j2	j4	fm68	4,2	208,76	8,03	626,27	j2		Excavación	26	20	0,0
	26	j1	j4	FM66	3,4E+38	102,27	7,31	306,81	Incondicionalmente estable			0,0		
	27	j4	FM65	FM66	3,4E+38	98,97	7,23	296,90	Incondicionalmente estable			0,0		
	28	j1	FM65	fm68	3,3	246,28	20,38	738,83	j1	fm68	Excavación	343	70	5,2
	30	j2	j3	j4	5,0	646,00	22,82	1938,01	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	31	j1	j3	FM65	5,2	142,82	16,63	428,47	j3	FM65	Excavación	327	72	2,6
	32	j2	j4	FM66	14,1	19,45	2,73	58,34	j2	j4	Excavación	61	17	0,0
	33	j1	FM65	FM66	44,1	453,46	35,97	1360,37	j1	FM65	Excavación	5	26	0,0
	34	j1	j4	FM65	44,1	792,35	63,30	2377,05	j1	FM65	Excavación	5	26	0,0
	35	j1	j2	FM65	42,9	4239,23	278,39	12717,69	j1	FM65	Excavación	5	26	0,2

Tabla 5.19. Información de cuñas conformadas en la Caja I.

El análisis determinístico para la Caja I identifica 6 cuñas formadas por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentran bajo el 1.4 de FS, siendo el mínimo FS modelado entre estas de 1.1. La tabla 5.17 indica que para la Caja I las cuñas

formadas que están bajo el FS estipulado (resaltadas en rojo) corresponden a las combinaciones 2, 4, 5, 8, 9 y 20. Es importante destacar que el ápice y los volúmenes de la mayoría de estas cuñas son relativamente pequeños (considerando que se encuentra ya sobrestimados por los antecedentes estructurales y geotécnicos establecidos) por lo que se espera que estas se configuren realmente en la caja estudiada caigan junto a los eventos de tronadura del pilar. Por los valores de dimensionamiento entregados en la combinación 20 se establece que evidentemente esta se encuentra sobredimensionada.

De igual manera se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunje hacia el interior de la excavación, incluyendo aquellas con factores de seguridad más bajos. Existe el caso de dos cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables. La integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de las cuñas riesgosas, el desprendimiento es en dirección a la excavación generada, lo cual no compromete la operación al realizarse una extracción en retroceso. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encontrará en la misma cota base de la futura excavación OS1-C, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja I demuestra que las combinaciones de cuñas identificadas con FS bajo 1.4 son las que poseen mayor probabilidad de desprendimiento, entre un 47,6% a un 93,6%. Mientras que el resto de las 28 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.10 Caja J

La sección o caja J corresponde a la futura caja Este-Sur del pilar planificado a recuperar denominado OS1-C (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las especificadas en la tabla 5.20.

Se genera un total de 56 combinaciones de formación de cuñas en la futura excavación del pilar OS1-C, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra

manera, de las 56 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 54 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja J. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.21.

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 67	<i>fm67</i>	60	56
Falla mayor 64	<i>FM64</i>	23	172
Falla menor 39	<i>fm39</i>	59	211
Falla menor 40	<i>fm40</i>	14	12

Tabla 5.20. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja J.

El análisis determinístico para la Caja J identifica 10 cuñas formadas por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentran bajo el 1.4 de FS, siendo el mínimo FS modelado entre estas de 0.5. La tabla 5.19 indica que para la Caja J las cuñas formadas que están bajo el FS estipulado (resaltadas en rojo) corresponden a las combinaciones 2, 3, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 31. Es importante destacar que el ápice y los volúmenes de estas cuñas son relativamente pequeños (considerando que se encuentra ya sobrestimados por los antecedentes estructurales y geotécnicos establecidos) por lo que se espera que estas se configuren realmente en la caja estudiada caigan junto a los eventos de tronadura del pilar.

Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación. Existe el caso de nueve cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables. La integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de las cuñas riesgosas, el desprendimiento es en dirección a la excavación generada, lo cual no compromete la operación al realizarse una extracción en retroceso. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encontrará en la misma cota base de la futura excavación OS1-C.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Tonelaje estimado	Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)				Hacia	Trend	Plunge	
J	1	j1	fm67	FM64	149,9	0,19	0,07	0,56	j1	FM64	Excavación	193	22	4,8
	2	j1	fm67	fm39	0,5	0,18	0,07	0,55	fm39		Excavación	211	59	4,8
	3	j3	j4	fm39	1,2	1684,56	12,53	5053,69	j3	fm39	Excavación	240	55	77,6
	4	j3	fm67	fm39	1,9	163,94	3,60	491,82	j3	fm39	Excavación	240	55	9,8
	5	j3	fm67	FM64	6,0	231,38	4,26	694,14	j3	FM64	Excavación	219	16	1,4
	6	j3	j4	FM64	5,5	584,11	12,16	1752,34	j3	FM64	Excavación	219	16	0,0
	7	j1	j2	FM64	6,2	195,81	3,26	587,42	j1	FM64	Excavación	193	22	0,4
	8	j1	j2	j4	101,9	154,01	3,51	462,03	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	9	j1	j4	fm67	2091,5	0,19	0,07	0,56	j1	j4	Excavación	189	2	0,8
	10	j1	j4	fm40	99,5	170,40	4,31	511,21	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	11	j1	j3	j4	2,5	153,67	2,63	461,00	j1		Excavación	279	81	7,4
	12	j2	j3	FM64	4,8	1332,89	15,64	3998,67	j3	FM64	Excavación	219	16	0,0
	13	j4	fm39	fm40	19,8	747,69	16,35	2243,08	fm39	fm40	Excavación	299	4	0,0
	14	fm67	fm39	fm40	8,2	2021,55	23,43	6064,66	fm67	fm40	Excavación	332	11	0,0
	15	j1	FM64	fm40	5,9	227,82	3,79	683,45	j1	FM64	Excavación	193	22	0,4
	16	j3	FM64	fm40	4,8	1476,48	18,47	4429,44	j3	FM64	Excavación	219	16	0,0
	17	FM64	fm39	fm40	17,6	2372,05	34,73	7116,14	fm39	fm40	Excavación	299	4	0,0
	18	j2	j4	fm39	52,9	1162,86	21,39	3488,57	j2	fm39	Excavación	300	1	0,0
	19	j2	fm67	fm39	8,5	1819,28	22,69	5457,84	j2	fm67	Excavación	333	12	0,0
	20	j2	FM64	fm39	49,3	3018,45	41,23	9055,34	j2	fm39	Excavación	300	1	0,0
	21	j1	j2	fm39	0,6	255,79	3,12	767,38	fm39		Excavación	211	59	53,2
	22	j1	fm39	fm40	0,6	312,94	3,56	938,83	fm39		Excavación	211	59	58,8
	23	j1	j4	fm39	0,6	460,91	4,52	1382,74	fm39		Excavación	211	59	69,0
	24	j2	j3	fm39	1,3	1237,68	11,39	3713,05	j3	fm39	Excavación	240	55	61,8
	25	j1	FM64	fm39	0,7	595,70	5,95	1787,11	fm39		Excavación	211	59	71,0
	26	j3	fm39	fm40	1,2	1568,11	13,03	4704,33	j3	fm39	Excavación	240	55	71,2
	27	j1	j3	fm39	0,9	975,07	24,59	2925,20	j1		Excavación	279	81	61,8
	28	j3	j4	fm67	3,4E+38	311,18	5,20	933,54			Incondicionalmente estable			1,2
	29	j4	fm67	fm40	10,1	427,42	10,92	1282,26	fm67	fm40	Excavación	332	11	0,0
	30	fm67	FM64	fm40	8,9	986,18	16,66	2958,54	fm67	fm40	Excavación	332	11	0,0
	31	j3	FM64	fm39	1,3	1235,39	13,24	3706,17	j3	fm39	Excavación	240	55	58,4
	32	j2	j4	fm67	9,8	542,76	12,55	1628,27	j2	fm67	Excavación	333	12	0,0
	33	j2	fm67	FM64	9,1	1016,73	17,25	3050,20	j2	fm67	Excavación	333	12	0,0
	34	j1	j3	FM64	1,5	335,58	6,92	1006,73	j1		Excavación	279	81	25,0
	35	j3	fm67	fm40	10,0	234,51	4,29	703,54	fm67	fm40	Excavación	332	11	0,6
	36	j2	j3	fm67	10,2	216,51	4,24	649,52	j2	fm67	Excavación	333	12	0,2
	38	j1	j2	j3	3,0	100,93	2,04	302,78	j1		Excavación	279	81	12,4
	39	j1	j3	fm40	2,8	118,14	2,24	354,43	j1		Excavación	279	81	9,8
	40	j1	j4	FM64	5,5	193,25	4,47	579,76	j1	FM64	Excavación	193	22	0,0
	41	j1	fm67	fm40	98,0	0,19	0,07	0,56	fm67	fm40	Excavación	332	11	0,0
	42	j1	j2	fm67	87,2	0,19	0,07	0,56	j2	FM64	Excavación	332	12	0,0
	43	j2	j4	FM64	3,4E+38	700,28	21,10	2100,83			Incondicionalmente estable			0,0
	44	j4	FM64	fm40	3,4E+38	500,91	16,37	1502,72			Incondicionalmente estable			0,0
	45	j2	j3	j4	3,4E+38	1505,38	25,61	4516,13			Incondicionalmente estable			0,0
	46	j4	FM64	fm39	3,4E+38	14795,96	349,08	44387,88			Incondicionalmente estable			0,0
	47	j4	fm67	fm39	3,4E+38	72004,79	763,87	216014,38			Incondicionalmente estable			0,0
	48	fm67	FM64	fm39	3,4E+38	42150,37	443,22	126451,11			Incondicionalmente estable			0,0
	49	j4	fm67	FM64	3,4E+38	43154,93	1111,12	129464,78			Incondicionalmente estable			0,0
	50	j3	j4	fm40	3,4E+38	2305,33	47,29	6916,00			Incondicionalmente estable			0,0
	51	j1	j2	fm40	40,3	37,03	2,92	111,08	j2	fm40	Excavación	322	9	0,0
	52	j2	j3	fm40	39,5	134,65	9,99	403,94	j2	fm40	Excavación	322	9	0,0
	53	j2	j4	fm40	41,7	157,53	13,83	472,60	j2	fm40	Excavación	322	9	0,0
	55	j2	FM64	fm40	40,3	309,93	24,53	929,79	j2	fm40	Excavación	322	9	0,0
	56	j2	fm39	fm40	38,5	656,28	44,56	1968,84	j2	fm40	Excavación	322	9	0,0

Tabla 5.21. Información de cuñas conformadas en la Caja J.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja J demuestra que las combinaciones de cuñas identificadas con FS bajo 1.4 son las que poseen mayor probabilidad de desprendimiento, entre un 53.2% a un 77.6%. Mientras que el resto de las 44 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.11 Caja K

La sección o caja K corresponde a la caja Oeste del caserón OS1-2 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla mayor 64	<i>FM64</i>	23	172
Falla menor 39	<i>fm39</i>	59	211
Falla menor 40	<i>fm40</i>	14	12

Tabla 5.22. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja K.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-2, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Por lo tanto, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 29 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja K. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.21.

El análisis determinístico para la Caja K no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 2.6. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunje hacia el interior de la excavación, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida. De igual manera es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encontrará en la misma cota base de la futura excavación OS1-C, por lo que en el

hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja K demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 15.8% el mayor porcentaje de activación determinado para una cuña modelada con FS = 2.9 en esta caja en particular.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)	
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)		Tonelaje estimado	Hacia	Trend		Plunge
K	1	j3	j4	fm39	2,6	1686,47	11,96	5059,40	j4	Excavación	103	22	0,4
	2	j3	j4	FM64	2,9	1220,53	15,54	3661,58	j4	Excavación	103	22	0,0
	3	j1	j2	FM64	2,9	381,11	4,08	1143,34	j2	Excavación	26	20	0,0
	4	j2	j3	FM64	3,6	1971,07	17,82	5913,22	j2 j3	Excavación	28	20	0,0
	5	j4	fm39	fm40	2,9	1668,94	21,37	5006,83	j4	Excavación	103	22	0,0
	6	j1	FM64	fm40	4,1	443,70	4,74	1331,09	fm40	Excavación	12	14	1,8
	7	j3	FM64	fm40	5,4	2850,57	23,00	8551,71	j3 fm40	Excavación	30	13	0,0
	8	j1	j2	j4	3,3	299,95	4,39	899,86	j2	Excavación	26	20	1,7
	9	j1	j4	fm40	4,9	332,12	5,39	996,35	fm40	Excavación	12	14	0,0
	10	FM64	fm39	fm40	5,1	4335,07	42,46	13005,20	FM64 fm39	Excavación	132	18	0,0
	12	j2	j4	fm39	2,7	2575,80	27,88	7727,40	j4	Excavación	103	22	1,1
	13	j2	FM64	fm39	5,1	4915,11	48,49	14745,32	FM64 fm39	Excavación	132	18	0,0
	14	j1	j2	fm39	2,9	212,04	2,93	636,12	j2	Excavación	26	20	0,3
	15	j1	fm39	fm40	3,9	300,13	3,51	900,39	fm40	Excavación	12	14	0,0
	17	j2	j3	fm39	4,3	744,31	9,55	2232,93	j2 j3	Excavación	28	20	0,0
	19	j3	fm39	fm40	6,1	1258,55	11,87	3775,66	j3 fm40	Excavación	30	13	0,0
	20	j1	j4	fm39	2,7	770,43	5,21	2311,28	j4	Excavación	103	22	12,3
	21	j3	FM64	fm39	5,6	1285,06	13,04	3855,19	FM64 fm39	Excavación	132	18	0,0
	22	j1	FM64	fm39	5,7	678,33	6,54	2034,99	FM64 fm39	Excavación	132	18	3,2
	23	j1	j3	fm40	3,9	54,28	1,73	162,83	fm40	Excavación	12	14	8,4
	24	j1	j2	j3	2,9	46,37	1,58	139,10	j2	Excavación	26	20	15,8
	25	j1	j4	FM64	3,0	418,91	5,79	1256,73	j4	Excavación	103	22	5,4
	26	j2	j4	FM64	3,3	1593,49	27,07	4780,48	j4	Excavación	103	22	4,6
	27	j4	FM64	fm40	3,6	1014,92	20,48	3044,75	j4	Excavación	103	22	3,1
	28	j4	FM64	fm39	3,7	47961,92	517,47	143885,75	j4 fm39	Excavación	133	19	0,0
	29	j2	j3	j4	3,7	2939,29	31,28	8817,86	j2 j3	Excavación	28	20	5,5
	30	j3	j4	fm40	6,1	4568,43	58,77	13705,29	j3 fm40	Excavación	30	13	1,4
	31	j1	j2	fm40	7,0	72,09	3,65	216,26	j2	Excavación	26	20	0,3
	32	j2	j3	fm40	7,4	288,78	12,88	866,34	j2 j3	Excavación	28	20	0,0

Tabla 5.23. Información de cuñas conformadas en la Caja K.

5.3.12 Caja L

La sección o caja L corresponde a la caja Norte del caserón OS1-2 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son especifican en la tabla 5.24.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-2, donde todas generan

bloques en la caja de interés. Es decir, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 20 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja L. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.25.

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	j1	81	279
Diaclasas 2	j2	20	26
Diaclasas 3	j3	73	304
Diaclasas 4	j4	22	103
Falla menor 68	fm68	78	37
Falla menor 30	fm30	82	295

Tabla 5.24. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja L.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras				Dimensionamiento				Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
						FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado		Hacia	Trend	Plunge	
L	1	j2	j3	fm68	3,4E+38	751,39	9,99	2254,17		Incondicionalmente estable			0,0	
	2	j3	j4	fm68	4,1	604,38	8,19	1813,13	j4	fm68	Excavación	122	21	0,8
	3	j2	fm68	fm30	3,4E+38	512,73	8,27	1538,19		Incondicionalmente estable			0,0	
	4	j4	fm68	fm30	4,5	426,45	7,01	1279,35	j4	fm68	Excavación	122	21	1,0
	5	j1	j2	fm68	3,4E+38	633,55	10,16	1900,64		Incondicionalmente estable			0,0	
	6	j1	j4	fm68	4,5	504,35	8,24	1513,05	j4	fm68	Excavación	122	21	0,0
	7	j3	fm68	fm30	3,4E+38	329,82	12,63	989,46		Incondicionalmente estable			0,0	
	8	j1	j3	fm68	3,4E+38	1994,92	77,55	5984,75		Incondicionalmente estable			0,0	
	9	j1	j2	j3	3,4E+38	490,67	14,75	1472,00		Incondicionalmente estable			0,0	
	10	j1	j3	j4	71,2	432,76	12,89	1298,29	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	11	j2	j4	fm68	5,9	165,30	7,43	495,91	j4	fm68	Excavación	122	21	0,0
	12	j2	j4	fm30	3,4E+38	426,64	18,12	1279,93		Incondicionalmente estable			0,0	
	13	j1	j2	j4	76,6	349,40	14,86	1048,20	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	14	j2	j3	j4	3,4E+38	446,49	19,80	1339,48	j2	j3	Excavación	28	20	0,0
	15	j2	j3	fm30	3,4E+38	1829,95	53,89	5489,84		Incondicionalmente estable			0,0	
	16	j3	j4	fm30	3,4E+38	1245,55	36,34	3736,66		Incondicionalmente estable			0,0	
	17	j1	fm68	fm30	64,2	0,47	0,52	1,42	j1	fm30	Excavación	264	81	0,0
	18	j1	j3	fm30	64,6	0,48	0,53	1,43	j1	fm30	Excavación	264	81	0,0
	19	j1	j2	fm30	63,8	0,50	0,55	1,51	j1	fm30	Excavación	264	81	0,0
	20	j1	j4	fm30	63,9	0,51	0,55	1,52	j1	fm30	Excavación	264	81	0,0

Tabla 5.25. Información de cuñas conformadas en la Caja L.

El análisis determinístico para la Caja L no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 4.1. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, resaltando el caso de nueve cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida en ninguno de los casos. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará

riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encuentra en la misma cota base de la excavación OS1-2, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

El análisis probabilístico para la Caja L demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 1.0% el mayor porcentaje de activación determinado para dos cuñas modeladas ambas con FS = 4.5, en esta caja en particular.

5.3.13 Caja M

La sección o caja M corresponde a la caja Este del caserón OS1-2 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas se observan a continuación:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 32	<i>fm32</i>	79	150
Falla mayor 34	<i>FM34</i>	11	245

Tabla 5.26. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja M.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-2, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Por lo tanto, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 17 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja M. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.27.

El análisis determinístico para la Caja M no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 1.4. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, resaltando el caso de dos cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables, por lo que la integridad de los accesos principales

aledaños no estaría comprometida. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 y OS1-2/3 se encontrarán en la misma cota base de la excavación OS1-2, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Tonelaje estimado	Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
		FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Hacia	Trend	Plunge							
M	1	j1	j2	fm32	2,9	162,05	2,71	486,14	j1	fm32	Excavación	212	68	8,0
	2	j3	j4	fm32	3,6	791,86	14,18	2375,58	j3	fm32	Excavación	230	42	0,0
	3	j2	j3	fm32	3,8	504,40	11,02	1513,20	j3	fm32	Excavación	230	42	0,0
	4	j2	j4	FM34	80,3	1,44	0,61	4,32	FM34	FM34	Excavación	245	11	0,0
	5	j3	j4	FM34	91,0	1,51	0,63	4,53	j3	FM34	Excavación	217	10	0,0
	6	j2	fm32	FM34	5,0	3153,13	28,88	9459,38	FM34	FM34	Excavación	245	11	0,0
	7	j1	j2	j4	89,6	342,21	4,58	1026,62	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	8	j1	j3	j4	3,4	70,60	2,03	211,79	j1	j1	Excavación	279	81	8,6
	9	j1	j4	fm32	2,2	372,69	4,33	1118,08	j1	fm32	Excavación	212	68	0,4
	10	j4	fm32	FM34	80,2	1,50	0,63	4,49	fm32	FM34	Excavación	238	11	0,0
	11	j1	j2	FM34	4,9	285,01	3,94	855,04	FM34	FM34	Excavación	245	11	5,8
	13	j2	j3	FM34	5,6	1477,25	14,50	4431,75	FM34	FM34	Excavación	245	11	0,0
	15	j1	fm32	FM34	1,4	1196,23	7,76	3588,69	j1	fm32	Excavación	212	68	27,4
	16	j1	j2	j3	4,1	46,37	1,58	139,10	j1	j1	Excavación	279	81	13,2
	17	j3	fm32	FM34	3,1	3713,36	31,33	11140,08	j3	fm32	Excavación	230	42	2,0
	18	j2	j3	j4	3,4E+38	3723,92	35,36	11171,76	Incondicionalmente estable			0,0		
	19	j2	j4	fm32	3,4E+38	66932,74	692,65	200798,22	Incondicionalmente estable			0,0		

Tabla 5.27. Información de cuñas conformadas en la Caja M.

El análisis probabilístico para la Caja M demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación, siendo 27.4% el mayor porcentaje de activación determinado para la cuña modelada con FS = 1.4 en esta caja en particular. Se destaca que se considera que este porcentaje de probabilidad de activación es el considera como límite de lo permisible, ya que se trata de una cuña modelada con un FS límite de 1.4, por lo que un porcentaje de probabilidad superior al mencionado ya se considera como preocupante.

5.3.14 Caja N

La sección o caja N corresponde a la caja Oeste del caserón OS1-3 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas se observan en la tabla 5.28.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-3, donde no todas generan bloques en la caja de interés. Por lo tanto, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 33 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja O. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.29.

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 28	<i>fm28</i>	72	238
Falla menor 29	<i>fm29</i>	80	76
Falla menor 33	<i>fm33</i>	88	246

Tabla 5.28. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja N.

El análisis determinístico para la Caja N identifica solo una cuña formada por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentra bajo el 1.4 de FS, siendo este un FS de 0.7. La tabla 5.29 indica que para la Caja N la cuña formada que está bajo el FS estipulado (resaltada en rojo) corresponde a la combinación 20. Es importante destacar que el ápice y el volumen de esta cuña son relativamente pequeños, por lo que está de formarse en la caja estudiada debe haber caído al extraerse el caserón o caerá en conjunto a los eventos de tronadura de los futuros pilares cercanos.

De igual manera se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunje hacia el interior de la excavación, incluyendo a la cuña de FS bajo, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de la cuña riesgosa, el desprendimiento será en dirección a la excavación ya existente, lo cual no compromete los trabajos operativos a realizarse en el sector. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 y OS1-2/3 se encontrarán en la misma cota base de la excavación OS1-3, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado		Hacia	Trend	Plunge	
N	1	j3	fm28	fm29	4,6	13,94	0,79	41,81	fm29	Excavación	76	80	3,0
	2	j3	fm29	fm33	4,6	11,40	0,72	34,19	fm29	Excavación	76	80	3,0
	3	j1	fm28	fm29	10,7	17,81	0,68	53,43	fm28 fm29	Excavación	160	32	10,4
	4	j1	fm29	fm33	12,8	15,85	0,67	47,55	fm29 fm33	Excavación	158	39	10,6
	5	j2	j4	fm33	2,5	1506,97	14,00	4520,92	j4	Excavación	103	22	2,2
	6	j2	fm28	fm29	6,0	747,42	7,84	2242,26	fm28 fm29	Excavación	160	32	0,0
	7	j2	j4	fm28	2,7	1398,16	15,94	4194,47	j4	Excavación	103	22	0,2
	8	j2	fm29	fm33	8,8	476,61	7,05	1429,82	fm29 fm33	Excavación	158	39	0,0
	9	j3	j4	fm28	2,2	938,98	8,03	2816,95	j4	Excavación	103	22	3,2
	10	j3	j4	fm33	2,2	267,44	3,99	802,32	j4	Excavación	103	22	4,4
	11	j1	j2	j4	3,3	300,20	4,39	900,59	j2	Excavación	26	20	1,0
	12	j1	j4	fm29	2,1	21,68	0,70	65,04	j4	Excavación	103	22	18,8
	13	j1	j3	j4	14,4	122,49	2,44	367,46	j3 j4	Excavación	32	7	0,0
	14	j1	j4	fm33	2,2	345,37	3,09	1036,10	j4	Excavación	103	22	3,0
	15	j1	j2	fm28	2,7	321,08	3,16	963,23	j2	Excavación	26	20	0,8
	16	j2	j3	fm28	3,9	669,54	7,53	2008,62	j2 j3	Excavación	28	20	0,2
	17	j2	j4	fm29	2,5	562,25	7,05	1686,75	j4	Excavación	103	22	2,8
	18	j1	j4	fm28	2,2	750,93	4,77	2252,78	j4	Excavación	103	22	2,4
	20	j3	j4	fm29	0,7	257,01	3,75	771,04	fm29	Excavación	76	80	52,8
	21	j2	fm28	fm33	12,7	735,43	14,53	2206,28	fm28 fm33	Excavación	157	26	0,0
	22	j3	fm28	fm33	14,1	117,39	3,64	352,16	fm28 fm33	Excavación	157	26	0,0
	23	j2	j3	fm33	4,6	219,81	3,88	659,44	j2 j3	Excavación	28	20	0,2
	24	j1	fm28	fm33	13,3	114,79	2,88	344,37	fm28 fm33	Excavación	157	26	0,0
	25	j1	j2	fm33	2,7	186,69	2,33	560,07	j2	Excavación	26	20	0,8
	27	j2	j3	fm29	5,0	15,49	0,82	46,48	fm29	Excavación	76	80	0,4
	28	j1	j2	j3	2,7	80,45	1,89	241,35	j2	Excavación	26	20	1,4
	29	j1	j3	fm29	7,5	4,84	0,39	14,52	fm29	Excavación	76	80	2,8
	30	j1	j2	fm29	2,7	18,21	0,65	54,64	j2	Excavación	26	20	3,8
	31	j2	j3	j4	3,7	2938,51	30,90	8815,53	j2 j3	Excavación	28	20	1,0
	32	j4	fm28	fm29	5,1	4847,29	31,12	14541,87	fm28 fm29	Excavación	160	32	0,0
	33	j4	fm29	fm33	7,6	3044,02	27,15	9132,06	fm29 fm33	Excavación	158	39	0,0
	34	fm28	fm29	fm33	7,8	7279,75	99,90	21839,26	fm29 fm33	Excavación	158	39	0,0
	35	j4	fm28	fm33	11,1	6650,43	66,98	19951,29	fm28 fm33	Excavación	157	26	0,0

Tabla 5.29. Información de cuñas conformadas en la Caja N.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja N demuestra que la combinación de la cuña identificada con FS bajo 1.4 es la que posee una mayor probabilidad de desprendimiento, de 52.8%. Mientras que el resto de las 32 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.15 Caja O

La sección o caja O corresponde a la caja Norte del caserón OS1-3 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las señaladas en la tabla 5.30.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-3, donde todas generan bloques en la caja de interés. Es decir, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta

excavación, las 35 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja O. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.31.

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 25	<i>fm25</i>	70	86
Falla menor 22	<i>fm22</i>	82	235
Falla menor 23	<i>fm23</i>	63	222

Tabla 5.30. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja O.

El análisis determinístico para la Caja O identifica 5 cuñas formadas por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentran bajo el 1.4 de FS, siendo el mínimo FS modelado entre estas de 1.3. La tabla 5.31 indica que para la Caja O las cuñas formadas que están bajo el FS estipulado (resaltadas en rojo) corresponden a las combinaciones 1, 2, 3, 4 y 5. Primeramente es necesario destacar que el valor de FS en estas cuñas es muy cercano al admisible, además de mencionar que los ápices y los volúmenes de estas cuñas son relativamente pequeños, por lo que estas de formarse en la caja estudiada caerán en conjunto a los eventos de tronadura de los futuros pilares cercanos. Es importante destacar que la futura unidad OS1-B no explotara la totalidad del pilar comprendido entre los caserones OS1-3 y OS1-4, lo que significa que no aumentara la superficie de cara libre en esta caja para hacer más propenso el desprendimiento de las cuñas. Por otro lado, el escáner de morfología real de la excavación OS1-3 demuestra que no existe una sobre excavación de esta caja de estudio, por lo que el pilar con respecto al acceso principal no se encuentra adelgazo, lo que demuestra que las cuñas modeladas no se han desprendido desde que se finalizó la explotación del caserón.

De igual manera se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, incluyendo aquellas con factores de seguridad más bajos. Existe el caso de cinco cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)	
		FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado	Hacia	Trend	Plunge						
O	1	j1	j3	fm23	1,3	56,36	3,69	169,08	fm23	Excavación	22	63	38,4	
	2	j2	j3	fm23	1,3	217,42	5,23	652,27	fm23	Excavación	222	63	53,4	
	3	j3	fm25	fm23	1,3	133,70	4,66	401,11	fm23	Excavación	222	63	53,6	
	4	j3	fm22	fm23	1,3	33,13	2,25	99,39	fm23	Excavación	222	63	39,6	
	5	j3	j4	fm23	1,3	214,01	5,52	642,03	fm23	Excavación	222	63	55,0	
	6	j3	j4	fm22	8,2	73,03	3,55	219,10	j4	fm22	Excavación	147	16	0,2
	7	j1	j3	fm22	22,7	0,37	0,31	1,11	fm22	Excavación	235	82	0,2	
	8	j3	fm25	fm22	4,5	51,44	3,18	154,33	fm25	fm22	Excavación	153	46	0,2
	9	j2	j3	fm22	3,4E+38	82,24	3,84	246,72	Incondicionalmente estable			0,2		
	10	j1	j2	fm23	1,5	650,52	10,56	1951,57	j1	fm23	Excavación	206	62	30,8
	11	j1	j4	fm23	1,5	685,49	12,44	2056,48	j1	fm23	Excavación	206	62	28,8
	12	j1	fm25	fm23	1,9	319,92	10,19	959,76	j1	fm23	Excavación	206	62	16,8
	13	j2	fm25	fm23	2,2	1929,39	19,76	5788,16	fm25	fm23	Excavación	158	41	0,2
	14	j4	fm25	fm23	2,3	2743,38	33,00	8230,14	fm25	fm23	Excavación	158	41	0,4
	15	j2	j3	fm25	3,4E+38	2789,34	38,17	8368,02	j3	fm25	Excavación	17	44	0,0
	16	j3	j4	fm25	12,6	1382,07	22,49	4146,20	j4	fm25	Excavación	173	8	0,0
	17	j2	fm25	fm22	2,9	945,61	17,16	2836,84	fm25	fm22	Excavación	153	46	0,0
	18	j4	fm25	fm22	3,0	1205,73	25,01	3617,20	fm25	fm22	Excavación	153	46	0,0
	19	j1	j2	j3	3,4E+38	275,08	12,16	825,24	Incondicionalmente estable			0,0		
	20	j1	j3	j4	80,2	224,65	10,36	673,94	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	21	fm25	fm22	fm23	3,4	1703,71	54,11	5111,13	fm25	fm22	Excavación	153	46	0,0
	22	j1	j3	fm25	3,4E+38	212,38	12,70	637,13	Incondicionalmente estable			0,0		
	23	j2	j4	fm25	17,4	290,42	13,11	871,26	j4	fm25	Excavación	173	8	0,0
	24	j1	j2	j4	76,6	349,13	14,85	1047,38	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	25	j2	j4	fm22	7,0	232,42	9,91	697,27	j4	fm22	Excavación	147	16	0,0
	26	j2	j4	fm23	6,4	175,23	8,34	525,68	j4	fm23	Excavación	141	18	0,0
	27	j2	j3	j4	3,4E+38	446,18	19,80	1338,54	Incondicionalmente estable			0,0		
	28	j2	fm22	fm23	7,1	1734,40	28,64	5203,20	fm22	fm23	Excavación	150	31	0,0
	29	j4	fm22	fm23	7,2	3995,16	73,59	11985,48	fm22	fm23	Excavación	150	31	0,0
	30	j1	j2	fm25	3,4E+38	14122,54	261,38	42367,62	Incondicionalmente estable			0,0		
	31	j1	j4	fm25	13,4	2144,75	45,25	6434,25	j4	fm25	Excavación	173	8	0,0
	32	j1	j4	fm22	21,5	0,42	0,34	1,27	fm22	Excavación	235	82	0,0	
	33	j1	j2	fm22	21,5	0,42	0,34	1,27	fm22	Excavación	235	82	0,0	
	34	j1	fm25	fm22	21,5	0,41	0,34	1,24	fm22	Excavación	235	82	0,0	
	35	j1	fm22	fm23	21,9	0,42	0,34	1,26	fm22	Excavación	235	82	13,0	

Tabla 5.31. Información de cuñas conformadas en la Caja O.

La integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de las cuñas riesgosas, el desprendimiento es en dirección a la excavación ya existente, lo cual no compromete los trabajos operativos a realizarse en el sector. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encuentra en la misma cota base de la excavación OS1-3, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja O demuestra que las combinaciones de cuñas identificadas con FS bajo 1.4 son las que poseen mayor probabilidad de desprendimiento, entre un 38.4% a un 55.0%. Mientras que el resto de las 30 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.16 Caja P

La sección o caja P corresponde a la futura caja Norte del pilar planificado a recuperar denominado OS1-B (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son especifican en la siguiente tabla:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla mayor 21	<i>FM21</i>	28	50
Falla menor 22	<i>fm22</i>	82	235
Falla menor 23	<i>fm23</i>	63	222

Tabla 5.32. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja P.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 35 combinaciones en la formación de cuñas en la futura excavación del pilar OS1-B, donde todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra manera, de las 35 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 35 forman cuñas en la pared lateral denominada Caja P. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.33.

El análisis determinístico para la Caja P identifica 2 cuñas formadas por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentran bajo el 1.4 de FS, siendo el mínimo FS modelado entre estas de 1.3. La tabla 5.33 indica que para la Caja P las cuñas formadas que están bajo el FS estipulado (resaltadas en rojo) corresponden a las combinaciones 1 y 2. Es necesario destacar en primer lugar que el valor del FS en estas cuñas es muy cercano al admisible, además de que los ápices y los volúmenes de estas cuñas son relativamente pequeños por lo que estas, de formarse en la caja estudiada, deben haber caído al extraerse el caserón o caerán en conjunto a los eventos de tronadura de los futuros pilares cercanos.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación	Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)	
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado		Hacia	Trend	Plunge		
P	1	j3	fm22	fm23	1,3	33,66	2,26	100,97	fm23	Excavación	222	63	40,0	
	2	j1	j3	fm23	1,3	57,20	3,71	171,60	fm23	Excavación	222	63	40,6	
	3	j3	j4	fm22	8,1	78,50	3,63	235,49	j4	fm22	Excavación	147	16	0,4
	4	j3	FM21	fm22	3,4E+38	82,80	3,84	248,41	Incondicionalmente estable			0,4		
	5	j1	j3	fm22	21,7	0,43	0,33	1,28	fm22	Excavación	235	82	0,2	
	6	j3	FM21	fm23	1,4	113,77	4,25	341,32	fm23	Excavación	222	63	36,8	
	7	j3	j4	fm23	1,4	123,00	4,59	369,01	fm23	Excavación	22	63	36,8	
	8	j2	j3	fm22	3,4E+38	87,85	3,92	263,54	Incondicionalmente estable			0,6		
	9	j2	j3	fm23	1,5	110,97	4,18	332,91	fm23	Excavación	222	63	31,0	
	10	j1	j4	fm23	1,7	465,48	10,94	1396,43	j1	fm23	Excavación	206	62	0,0
	11	j1	FM21	fm23	1,7	389,43	9,16	1168,30	j1	fm23	Excavación	206	62	13,4
	12	j1	j2	fm23	1,7	365,38	8,71	1096,15	j1	fm23	Excavación	206	62	12,6
	13	j1	j2	j3	3,4E+38	294,10	12,43	882,30	Incondicionalmente estable			0,0		
	14	j1	j3	j4	79,1	242,05	10,62	726,16	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	15	j1	j3	FM21	3,4E+38	288,11	12,68	864,33	Incondicionalmente estable			0,0		
	16	j2	j3	FM21	3,4E+38	523,44	34,38	1570,31	Incondicionalmente estable			0,0		
	17	j2	j4	FM21	57,4	0,51	0,60	1,54	j4	Excavación	103	22	0,0	
	18	j1	j2	j4	87,1	179,21	11,89	537,63	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	19	j2	j4	fm22	8,1	119,23	7,93	357,68	j4	fm22	Excavación	147	16	0,0
	20	j2	j4	fm23	7,4	89,99	6,67	269,97	j4	fm23	Excavación	141	18	0,0
	21	j1	j2	FM21	3,4E+38	1962,77	123,26	5888,31	Incondicionalmente estable			0,0		
	22	j2	j3	j4	3,4E+38	229,02	15,85	687,05	Incondicionalmente estable			0,0		
	23	j4	fm22	fm23	7,4	2687,33	64,48	8062,00	fm22	fm23	Excavación	150	31	0,0
	24	FM21	fm22	fm23	7,4	1265,89	30,41	3797,67	fm22	fm23	Excavación	150	31	0,0
	25	j2	fm22	fm23	7,5	968,92	23,59	2906,76	fm22	fm23	Excavación	324	10	0,0
	26	j2	FM21	fm22	3,4E+38	469,06	29,55	1407,18	Incondicionalmente estable			0,0		
	27	j2	FM21	fm23	41,1	245,71	17,35	737,12	FM21	fm23	Excavación	134	3	0,0
	28	j1	j4	fm22	20,5	0,49	0,36	1,48	fm22	Excavación	235	82	0,6	
	29	j1	FM21	fm22	20,5	0,49	0,35	1,47	fm22	Excavación	235	82	0,6	
	30	j1	j2	fm22	20,5	0,49	0,35	1,47	fm22	Excavación	235	82	0,4	
	31	j1	fm22	fm23	20,9	0,49	0,36	1,46	fm22	Excavación	235	82	10,8	
	32	j3	j4	FM21	54,6	0,56	0,62	1,68	j4	Excavación	103	22	0,0	
	33	j1	j4	FM21	54,4	0,57	0,63	1,71	j4	Excavación	103	22	0,0	
	34	j4	FM21	fm22	54,5	0,59	0,64	1,76	j4	Excavación	103	22	0,0	
	35	j4	FM21	fm23	54,8	0,58	0,65	1,75	j4	Excavación	103	22	0,0	

Tabla 5.33. Información de cuñas conformadas en la Caja P.

De igual manera se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, incluyendo aquellas con factores de seguridad más bajos. Existe el caso de ocho cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables. La integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de las cuñas riesgosas, el desprendimiento es en dirección a la excavación generada, lo cual no compromete la operación al realizarse una extracción en retroceso. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 y OS1-3/4 se encuentran en la misma cota base de la futura excavación OS1-B, por lo que en el hipotético caso en que se unan las

excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja P demuestra que las combinaciones de cuñas identificadas con FS bajo 1.4 son las que poseen mayor probabilidad de desprendimiento, entre un 40.0% a un 40.6%. Mientras que el resto de las 33 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.17 Caja Q

La sección o caja Q corresponde a la caja Norte del caserón OS1-4 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las observadas a continuación:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 9	<i>fm9</i>	74	270
Falla menor 10	<i>fm10</i>	61	221

Tabla 5.34. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja Q.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 20 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-4, donde todas generan bloques en la caja de interés. Es decir, de las 20 combinaciones totales y posibles en esta excavación, las 20 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja Q. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.35.

El análisis determinístico para la Caja Q identifica 4 cuñas formadas por las combinaciones de estructuras consideradas que se encuentran bajo el 1.4 de FS, siendo el mínimo FS modelado entre estas de 1.2. La tabla 5.35 indica que para la Caja Q las cuñas formadas que están bajo el FS estipulado (resaltadas en rojo) corresponden a las combinaciones 1, 2, 3 y 4. Se destaca que el valor de FS en estas cuñas no es muy lejano al admisible, además que sus ápices y volúmenes son relativamente pequeños, por lo que

estas, de formarse en la caja estudiada, deben haber caído al extraerse el caserón o caerán en conjunto a los eventos de tronadura de los futuros pilares cercanos.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento			Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)	
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)			Tonelaje estimado	Hacia	Trend		Plunge
Q	1	j2	j3	fm10	1,2	323,15	6,24	969,45	fm10	Excavación	221	61	63,6	
	2	j3	fm9	fm10	1,2	17,91	2,19	53,74	fm10	Excavación	221	61	32,8	
	3	j3	j4	fm10	1,2	316,84	6,64	950,52	fm10	Excavación	221	61	64,6	
	4	j1	j3	fm10	1,2	70,77	4,19	212,30	fm10	Excavación	221	61	46,8	
	5	j1	j2	fm10	1,4	846,64	11,73	2539,93	j1	fm10	Excavación	205	60	37,6
	6	j1	j4	fm10	1,5	894,18	14,04	2682,54	j1	fm10	Excavación	205	60	34,8
	7	j2	fm9	fm10	1,6	668,87	11,15	2006,60	fm9	fm10	Excavación	211	61	24,6
	8	j4	fm9	fm10	1,7	726,92	13,37	2180,75	fm9	fm10	Excavación	211	61	24,0
	9	j1	j3	fm9	12,5	16,21	2,79	48,62	j1	fm9	Excavación	200	50	0,0
	10	j2	j3	fm9	3,4E+38	31,61	3,34	94,83			Incondicionalmente estable			0,0
	11	j3	j4	fm9	43,2	29,59	3,18	88,78	j4	fm9	Excavación	181	5	0,0
	12	j1	j2	j3	3,4E+38	292,11	12,40	876,34			Incondicionalmente estable			0,0
	13	j1	j3	j4	79,3	238,57	10,57	715,71	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	14	j1	fm9	fm10	3,4	380,00	32,37	1140,00	fm9	fm10	Excavación	211	61	21,4
	15	j1	j2	j4	76,6	349,58	14,86	1048,75	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	16	j2	j4	fm9	24,4	305,48	13,33	916,44	j4	fm9	Excavación	181	5	0,0
	17	j2	j4	fm10	6,4	170,62	8,22	511,85	j4	fm10	Excavación	141	18	0,0
	18	j2	j3	j4	3,4E+38	446,48	19,80	1339,44			Incondicionalmente estable			0,0
	19	j1	j2	fm9	9,4	239,62	16,57	718,86	j1	fm9	Excavación	200	50	0,0
	20	j1	j4	fm9	9,4	303,96	21,58	911,88	j1	fm9	Excavación	200	50	0,0

Tabla 5.35. Información de cuñas conformadas en la Caja Q.

De igual manera se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, incluyendo aquellas con factores de seguridad más bajos. Existe el caso de tres cuñas modeladas cuyo FS es tan elevado que se consideran incondicionalmente estables. La integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida, ya que, para el caso de las cuñas riesgosas, el desprendimiento es en dirección a la excavación ya existente, lo cual no compromete los trabajos operativos a realizarse en el sector. Es importante mencionar que el eventual desprendimiento de alguna de las cuñas modeladas en esta caja no generará riesgo de caída de distinto nivel para los involucrados en la operación, debido a que el acceso principal del sector OS1 se encuentra en la misma cota base de la excavación OS1-4, por lo que en el hipotético caso en que se unan las excavaciones no existirá riesgo de caída desde el acceso principal hacia el interior del caserón.

Finalmente, el análisis probabilístico para la Caja Q demuestra que las combinaciones de cuñas identificadas con FS bajo 1.4 son las que poseen mayor probabilidad de desprendimiento, entre un 32.8% a un 63.6%. Mientras que el resto de las 16 posibles combinaciones de cuñas restantes no poseen probabilidades significativas de activación.

5.3.18 Caja R

La sección o caja R corresponde a la caja Norte del caserón OS1-5 (véase Figura 9.2). Las discontinuidades consideradas en esta caja para su análisis de formación de cuñas son las siguientes:

Discontinuidad	Referencia	Dip	Dip direction
Diaclasas 1	<i>j1</i>	81	279
Diaclasas 2	<i>j2</i>	20	26
Diaclasas 3	<i>j3</i>	73	304
Diaclasas 4	<i>j4</i>	22	103
Falla menor 3	<i>fm3</i>	88	309

Tabla 5.36. Discontinuidades consideradas en el análisis cinemático de la Caja R.

La interacción entre las discontinuidades consideradas genera un total de 10 combinaciones en la formación de cuñas en la excavación OS1-13, donde todas generan bloques en la caja de interés. Dicho de otra manera, de las 10 combinaciones totales y posibles en esta excavación, solo 3 forman cuñas en la pared lateral denominada como Caja R. Las características de las cuñas formadas por las respectivas combinaciones de estructuras en la sección de interés se muestran en la tabla 5.37.

Sección	Combinación	Combinación de estructuras			Dimensionamiento				Estructuras de activación		Dirección de desprendimiento			Probabilidad de activación (%)
					FS	Volumen estimado (m3)	Ápice (m)	Tonelaje estimado			Hacia	Trend	Plunge	
R	1	j1	j2	j4	76,6	349,93	14,87	1049,78	j1	j4	Excavación	189	2	0,0
	2	j1	j3	j4	105,9	59,39	6,65	178,16	j1	j4	Excavación	189	2	6,2
	3	j1	j3	fm3	8,3	7,03	2,05	21,09	j1	fm3	Excavación	227	75	2,2

Tabla 5.37. Información de cuñas conformadas en la Caja R.

El análisis determinístico para la Caja R no identifica cuñas formadas por las combinaciones de estructuras involucradas bajo 1.4 de FS. El FS mínimo modelado entre el total de cuñas analizadas es de 8.3. Se destaca que el vector de desplazamiento o desprendimiento de todas las cuñas tiene un trend y plunge hacia el interior de la excavación, por lo que la integridad de los accesos principales aledaños no estaría comprometida.

El análisis probabilístico para la Caja R demuestra que las cuñas modeladas no poseen probabilidades significativas de activación.

5.4 Validación estereográfica de la cinemática de cuñas críticas

En total, mediante el análisis determinístico de las cajas de estudio asociadas al acceso principal del sector OS1, se detectaron la posibilidad de existencia de 33 combinaciones de discontinuidades cuyo factor de seguridad estaría por debajo del límite permitido, y, por consiguiente, significan un riesgo de desprendimiento y deslizamiento latente.

Se seleccionó las cuñas inestables más representativas de cada una de las siete cajas donde se identificaron combinaciones riesgosas, las cuales se encuentran graficadas para su visualización en el plano oficial del estudio presenta en el Anexo 3 (véase Figura 9.2). A modo de validar la condición de riesgo de estas cuñas, se representan en la red estereográfica para contrastar sus características estructurales con respecto al ángulo de fricción de 33° establecido para el sector OS1.

5.4.1 Cuña C9A

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°3 y las fallas menores n°61 y 62, y se ubicaría en el área central de la caja Este del caserón explotado OS1-13. Según el análisis determinístico, su FS sería de 1.3.

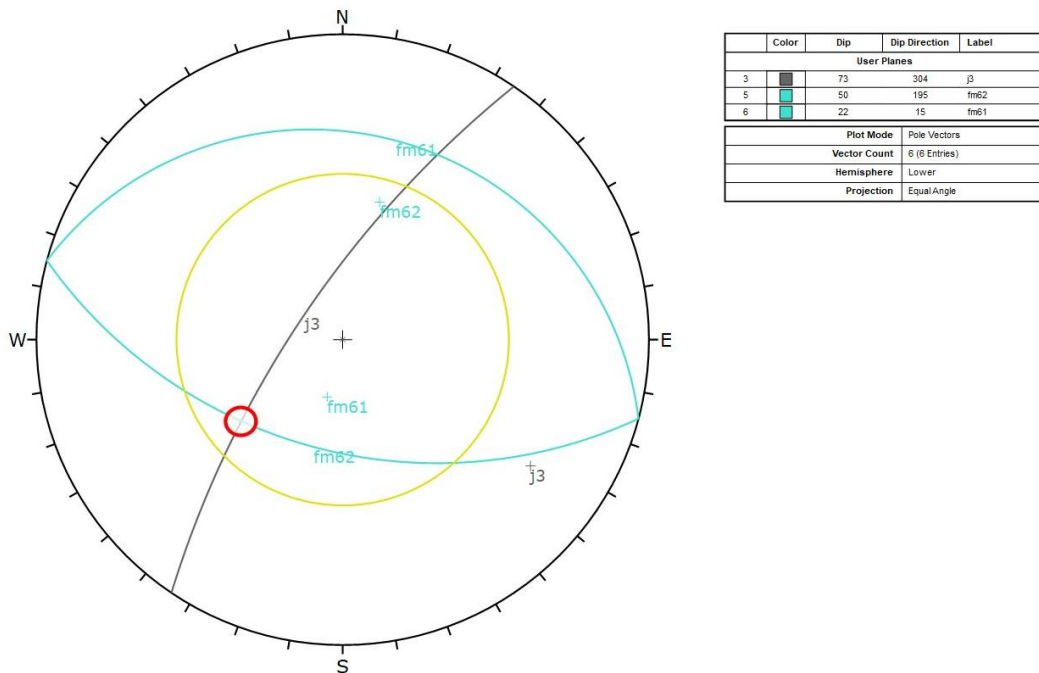


Figura 5.2. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C9A.

Según la estereografía observada en la figura 5.2, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae dentro de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por acción de la gravedad. El desprendimiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que se activará mediante el plano estructural de las diaclasas n°3, la falla menor n°62 o el generado por la intersección de estas.

5.4.2 Cuña C7A

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°1 y 2, y la falla menor n°62, y se ubicaría en el área sur de la caja Este del caserón explotado OS1-13. Según el análisis determinístico, su FS sería de 0.6.

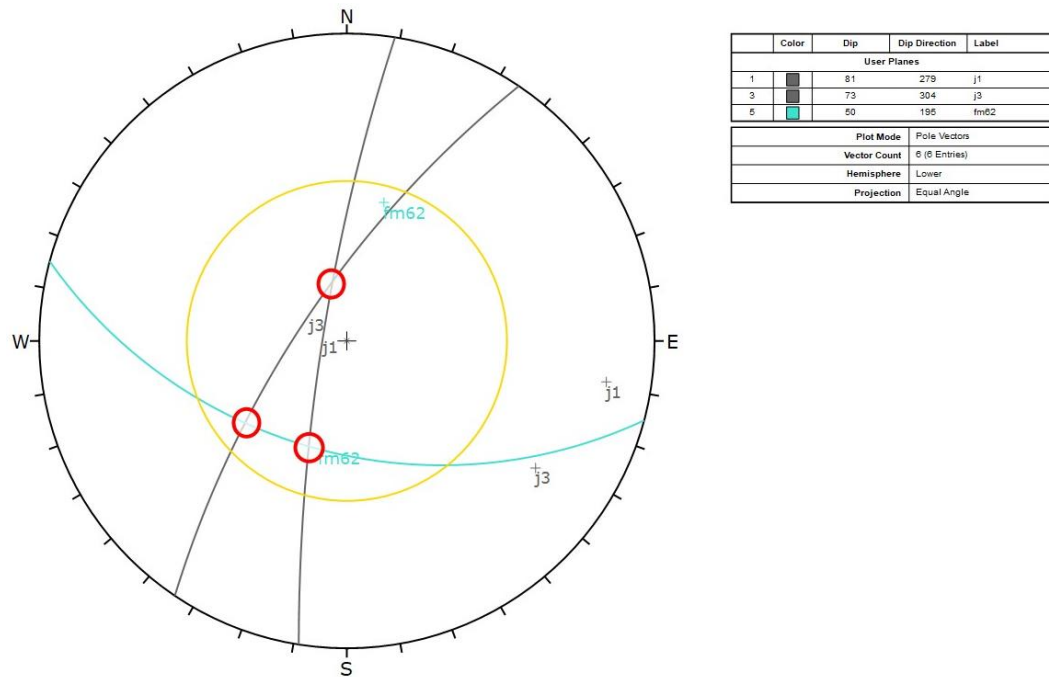


Figura 5.3. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C7A.

Según la estereografía observada en la figura 5.3, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae fuera de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por gravedad y deslizamiento. El deslizamiento se valida debido a que posee las tres intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que el deslizamiento se podría activar, en estricto rigor,

por cualquiera de estas, pero existiendo como principal preferencia el plano estructural de las diaclasas n°1, debido a que mantea hacia el interior de la excavación.

5.4.3 Cuña C2I

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°3, la falla menor n°68 y la falla mayor n°66, y se ubicaría en el área central de la caja Sur del futuro pilar productivo OS1-C. Según el análisis determinístico, su FS sería de 1.1.

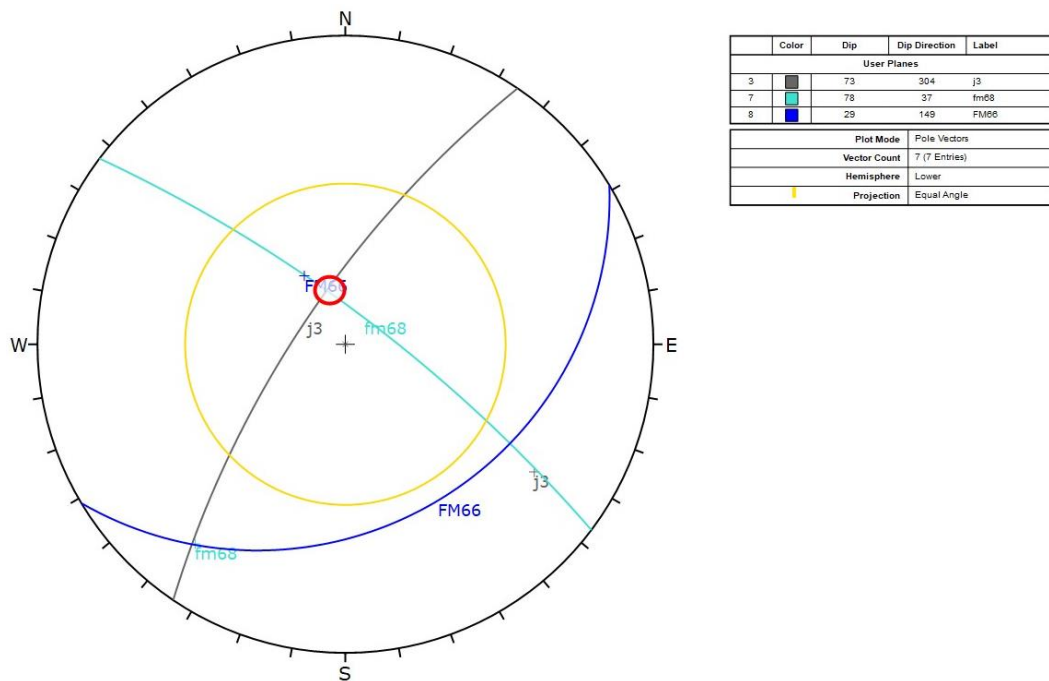


Figura 5.4. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C2I.

Según la estereografía observada en la figura 5.4, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae dentro de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por acción de la gravedad. El desprendimiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que se activará mediante el plano estructural de las diaclasas n°3, la falla menor n°68 o el generado por la intersección de estas.

5.4.4 Cuña C22J

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°1, y las fallas menores n°39 y 40, y se ubicaría en el área sur de la caja Este del futuro pilar productivo OS1-C. Según el análisis determinístico, su FS sería de 0.6.

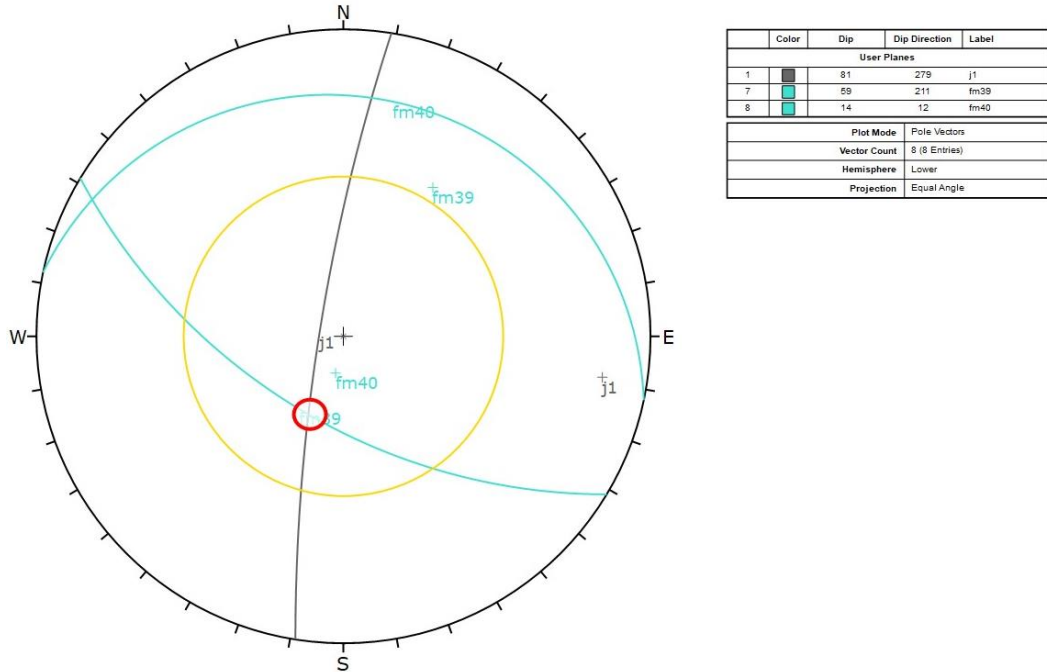


Figura 5.5. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C22J.

Según la estereografía observada en la figura 5.5, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae fuera de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por gravedad y deslizamiento. El deslizamiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que el deslizamiento se podría activar, en estricto rigor, por cualquiera de las dos discontinuidades que se intersectan, pero existiendo como principal preferencia el plano estructural de la falla menor n°39, debido a que manta hacia el interior de la futura excavación.

5.4.5 Cuña C25J

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°1, la falla menor n°39 y la falla mayor n°40, y se ubicaría en el área sur de la caja Este del futuro pilar productivo OS1-C. Según el análisis determinístico, su FS sería de 0.7.

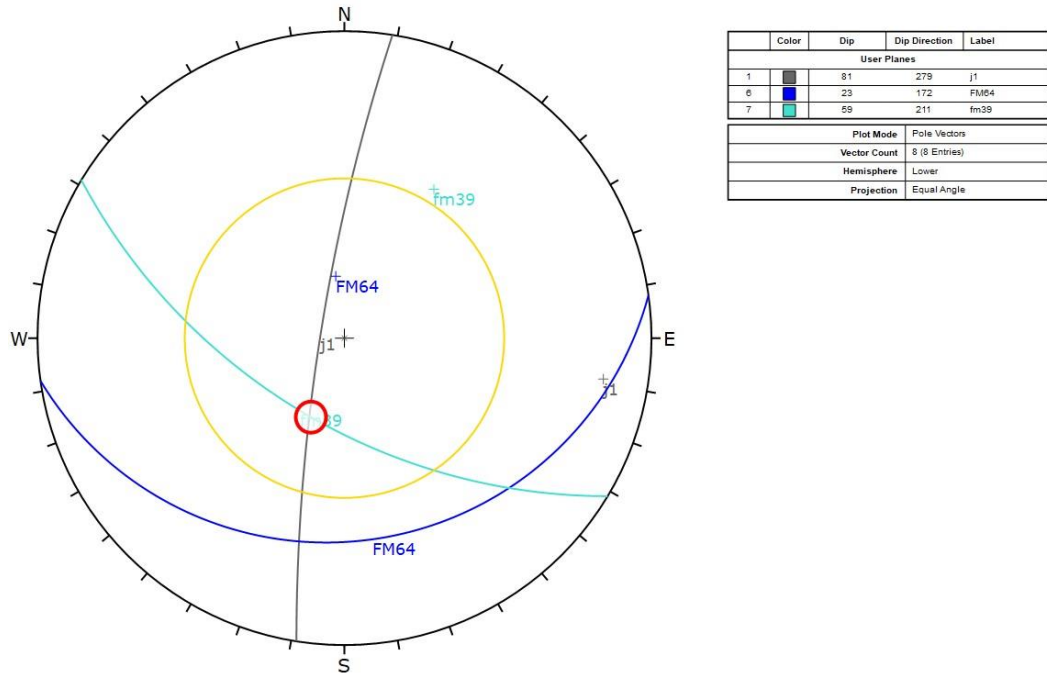


Figura 5.6. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C25J.

Según la estereografía observada en la figura 5.6, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae fuera de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por gravedad y deslizamiento. El deslizamiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que el deslizamiento se podría activar, en estricto rigor, por cualquiera de las dos discontinuidades que se intersectan, pero existiendo como principal preferencia el plano estructural de la falla menor n°39, debido a que mantiene hacia el interior de la futura excavación.

5.4.6 Cuña C20N

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°3 y 4, y la falla menor n°29. Se ubicaría en el área central de la caja Oeste del caserón explotado OS1-3. Según el análisis determinístico, su FS sería de 0.7.

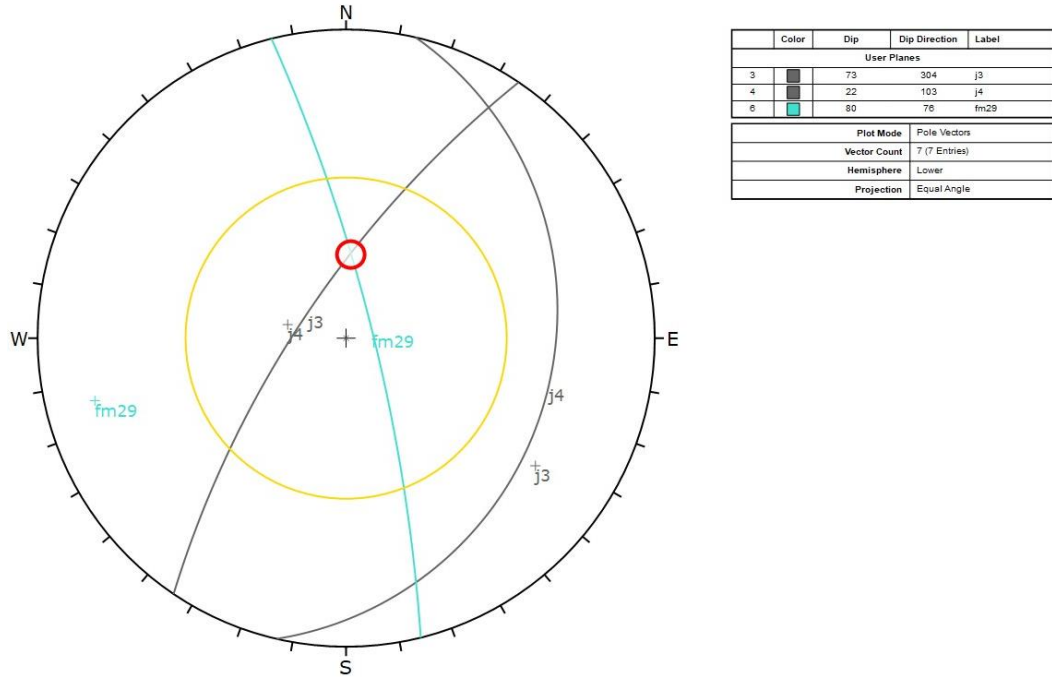


Figura 5.7. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C20N.

Según la estereografía observada en la figura 5.7, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae fuera de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por gravedad y deslizamiento. El deslizamiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que el deslizamiento se podría activar, en estricto rigor, por cualquiera de las dos discontinuidades que se intersectan, pero existiendo como principal preferencia el plano estructural de la falla menor n°29, debido a que mantiene hacia el interior de la excavación.

5.4.7 Cuña C5O

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°3 y 4, y la falla menor n°23. Se ubicaría en la esquina oriental de la caja Norte del caserón explotado OS1-3. Según el análisis determinístico, su FS sería de 1.3.

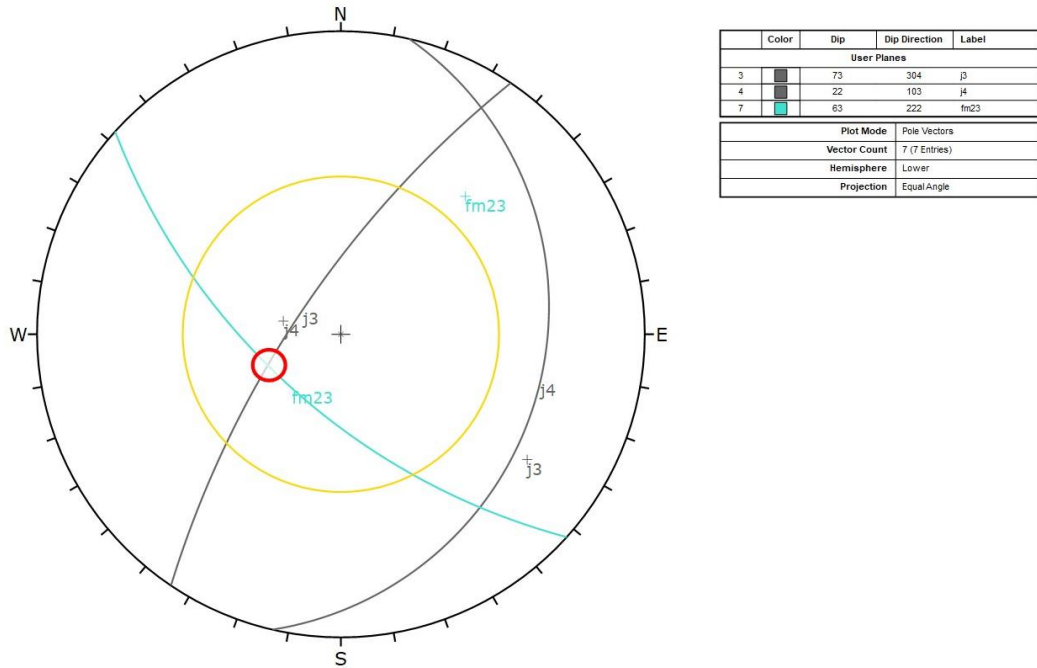


Figura 5.8. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C5O.

Según la estereografía observada en la figura 5.8, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae dentro de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por acción de la gravedad. El desprendimiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que se activará mediante el plano estructural de las diaclasas n°3, la falla menor n°23 o el generado por la intersección de estas.

5.4.8 Cuña C1P

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°3 y las fallas menores n°22 y 22. Se ubicaría en el área central de la caja Norte del futuro pilar productivo OS1-B. Según el análisis determinístico, su FS sería de 1.3.

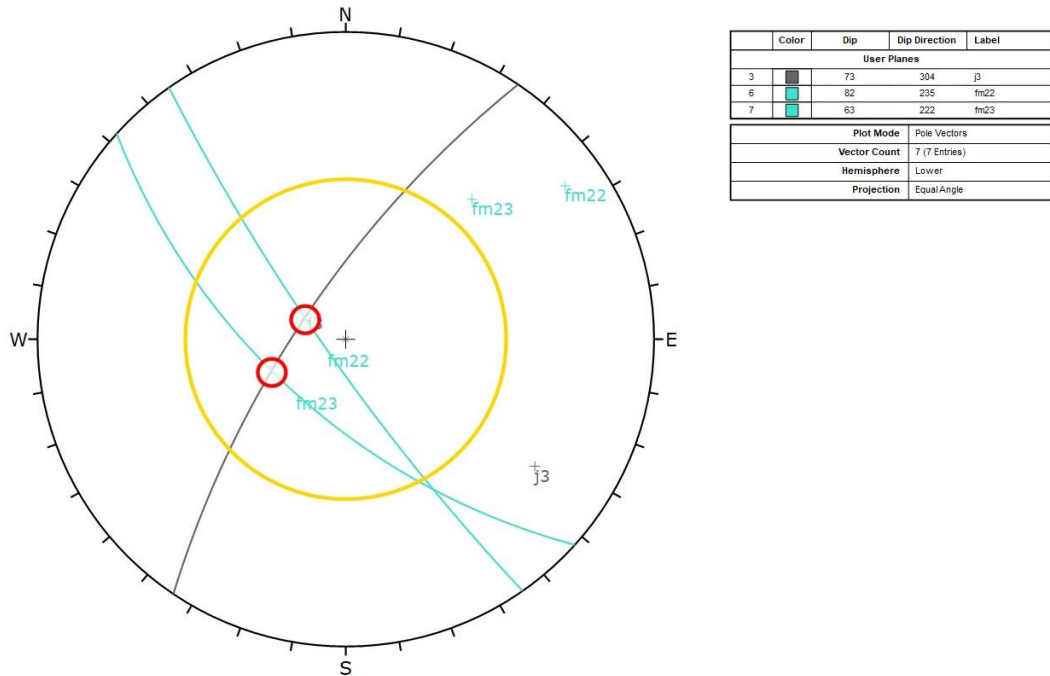


Figura 5.9. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C1P.

Según la estereografía observada en la figura 5.9, la proyección vertical del ápice de esta cuña cae fuera de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por gravedad y deslizamiento. El deslizamiento se valida debido a que posee dos de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de fricción (círculo amarillo), por lo que el deslizamiento se podría activar, en estricto rigor, por cualquiera de las discontinuidades que se intersectan con otra, pero existiendo como principal preferencia el plano estructural de la falla menor n°23, debido a que mantiene hacia el interior de la excavación.

5.4.9 Cuña C3Q

Este bloque crítico corresponde al formado por la intersección de la familia de diaclasas n°3 y 4, y la falla menor n°10. Se ubicaría en el área central de la caja Norte del caserón explotado OS1-4. Según el análisis determinístico, su FS sería de 1.2.

Según la estereografía observada en la figura 5.10, la proyección vertical del ápice de esta cuña (cruz) cae dentro de la superficie libre de esta, por lo que su desprendimiento será por acción de la gravedad. El desprendimiento se valida debido a que posee una de las intersecciones de sus discontinuidades formadoras (círculo rojo) dentro del cono de

fricción (círculo amarillo), por lo que se activará mediante el plano estructural de las diaclasas n°3, la falla menor n°10 o el generado por la intersección de estas.

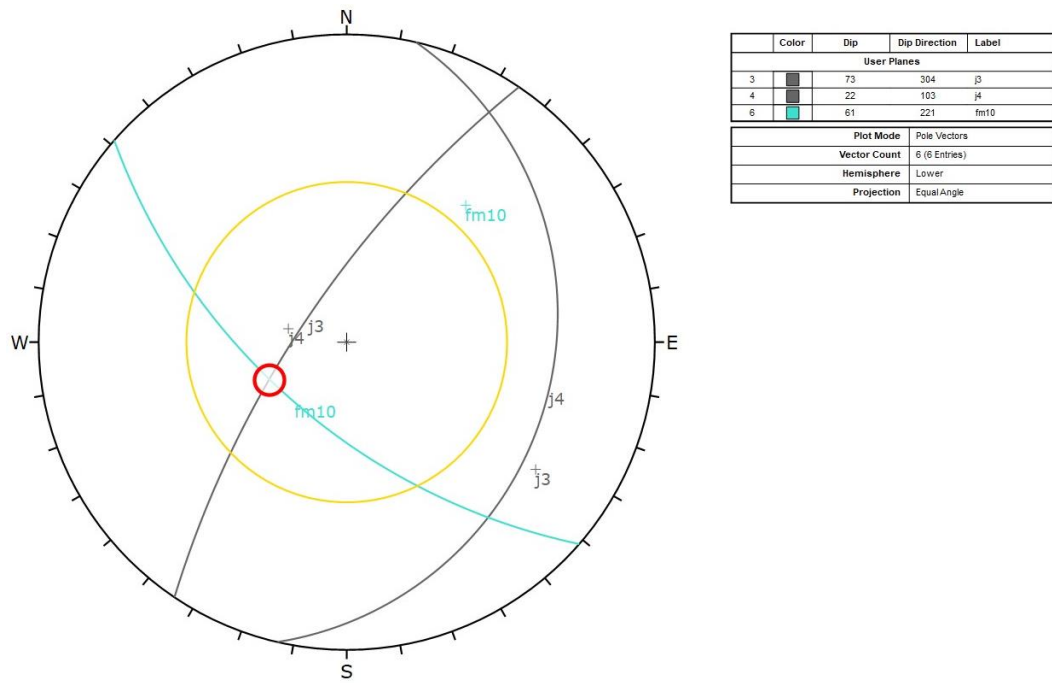


Figura 5.10. Representación estereográfica de cinemática de la cuña C3Q.

6 DISCUSIONES

6.1 Relación geométrica-estructural de cuñas sensibles

Los resultados demuestran que eventualmente solo siete secciones o cajas de estudio, presentes en el sector OS1, tendrían cuñas sensibles con factores de seguridad menores a 1.4, las cuales corresponderían a las cajas A, I, J, N, O, P y Q. Por otro lado, los análisis determinísticos de formación de cuñas identificaron 33 combinaciones estructurales posibles (de un total de 435 modeladas) que formarían cuñas con alta sensibilidad de desprendimiento.

Cuñas sensibles identificadas					
Caja	Cantidad	Infraestructura	Rango de FS	Probabilidad de activación	
				Media (< 50%)	Alta (> 50%)
J	10	Caserón	0,5 a 1,3	1	9
I	6	Pilar	1,1 a 1,3	1	5
N	1	Caserón	0,7	0	1
O	5	Caserón	1,3	2	3
P	2	Pilar	1,3	2	0
Q	4	Caserón	1,2	2	2
A	5	Caserón	0,6 a 1,3	2	2
Total	33			10	22

Tabla 6.1. Resumen de cuñas identificadas con factores de seguridad menores al 1.4.

Del total de cuñas sensibles identificadas en el sector asociado al acceso principal del sector OS1, 22 poseen una probabilidad de activación alta. La mayoría de estas afectan a cajas de caserones ya explotados, por lo que de ocurrir su desprendimiento ocurriría directamente hacia la excavación existente.

Los caserones identificados que poseen cajas con formación de cuñas sensibles a desprendimiento son el OS1-3, OS1-4 y OS1-13. El pilar planificado a extraer a futuro más afectado por cuñas sensibles a desprendimiento es el denominado OS1-C, el cual posee 16 combinaciones posibles formadoras de cuñas con mediana a alta probabilidad de activación.

Se determina que el acceso principal al sector OS1 no presenta compromiso en su estabilidad global por control estructural, debido a que el posible desprendimiento de todas las cuñas sensibles identificadas ocurriría en dirección de las excavaciones mayores

ya existentes (caserones), o que se crearan a futuro (pilares), debido a la disposición estructural de las discontinuidades geológicas existentes y la orientación favorable de los túneles, no comprometiendo la operatividad minera si es que planifica de buena manera.

Por otro lado, la activación eventual de estos bloques sensibles identificados puede significar un adelgazamiento relativo de algunos pilares de roca entra las excavaciones mayores y las paredes de los túneles de tránsito, pudiendo afectar de manera puntual el acceso y operación en algunos puntos de área de estudio. Es debido a lo anterior, y basándose en la ubicación y probabilidad de falla de las cuñas sensibles detectadas, se determinan como puntos de “Precaución geomecánica” los siguientes tramos de tránsito y operación:

1. El túnel 165 a la altura del área sur de la pared Este del caserón OS1-13.
2. La labor de acceso al undercut sur y este del futuro pilar productivo OS1-C.
3. La labor de acceso entre los caserones OS1-2 y OS1-3.
4. El acceso principal del sector OS1 a la altura de las paredes Norte de los caserones OS1-3 y OS1-4.
5. La labor de acceso al undercut del futuro pilar productivo OS1-B.

Es importante recalcar que la existencia de estos puntos de “Precaución geomecánica” no compromete la estabilidad global del sector OS1. Lo anterior se debe que las paredes detectadas con bloques críticos son ajenas entre sí, el desprendimiento será hacia el interior de las excavaciones existentes y futuras, y los volúmenes involucrados son relativamente pequeños.

Este análisis presentado como resultado cumple con los objetivos enunciados en el presente estudio de determinar las configuraciones estructurales con presencia de riesgo de inestabilidad mediante la evaluación de su factor de seguridad y el de identificar la probabilidad de activación de estos bloques potencialmente riesgosos.

6.2 Estabilidad de cuñas en base a la morfología actual de caserones

La observación de la topografía real y actual de las excavaciones ya explotadas (caserones) evidencian que, a nivel general, en el sector de estudio no existen sobre-excavaciones significativas al interior de las cavidades y, por consiguiente, sobre las

secciones o cajas analizadas. Esto sería relevantemente positivo, ya que significaría que las condiciones geomecánicas del área se han mantenido estables en el transcurso del tiempo, considerando que la mayoría de los caserones del sector OS1 fueron explotados hace más de 15 años.

El análisis determinístico de cuñas determino la existencia de combinaciones formadoras de cuñas críticas tanto en la sección o caja N, como en la O, las cuales corresponden a la pared Oeste y Norte del caserón OS1-3, respectivamente. En la figura 6.1 se puede observar, mediante la comparación del escáner de morfología real con respecto al isométrico de diseño del caserón, que existe una sobre-excavación de 2.2 metros aproximadamente en la parte inferior de la caja N, la cual se puede asociar, en base a su morfología y orientación, al desprendimiento de una de las cuñas modeladas e identificadas como sensibles a desprenderse, cuyo factor de seguridad y probabilidad de activación eran de 0.7 y 52.8% respectivamente. Se destaca que tanto el ápice del bloque, como el volumen final desprendido, son menores a lo entregado en el análisis determinístico, asociado a que este último fue modelado en base a las condiciones más desfavorables de estabilidad.

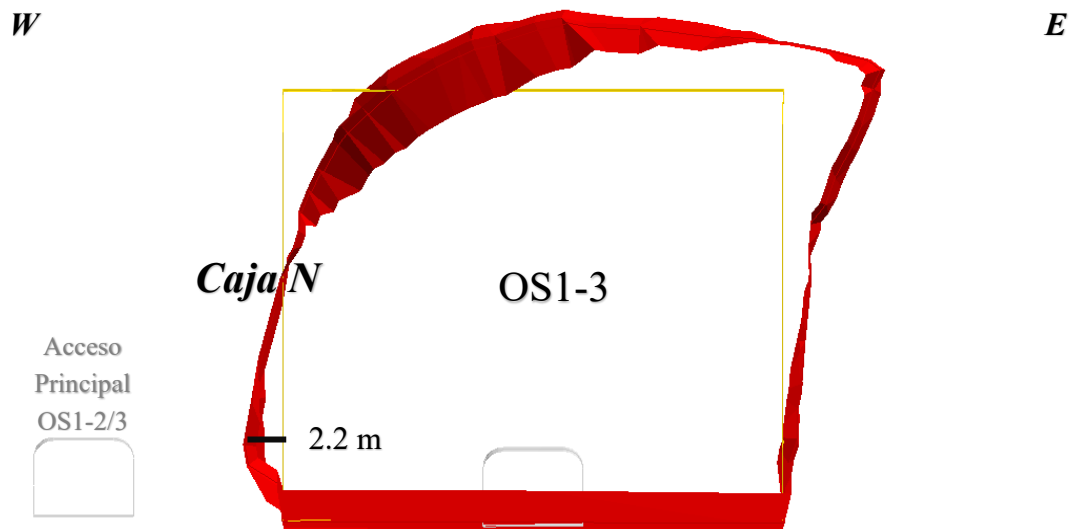


Figura 6.1. Morfología real del caserón OS1-3 y la caja estudiada N (no a escala).

Por otro lado, relacionado a la caja En la figura 6.2 se puede observar que no hay presencia de sobre-excavación para la caja O (pared Norte del caserón OS1.3), por lo que se puede afirmar que a la actualidad no se ha activado el desprendimiento de ninguna de las cinco cuñas sensibles identificadas.

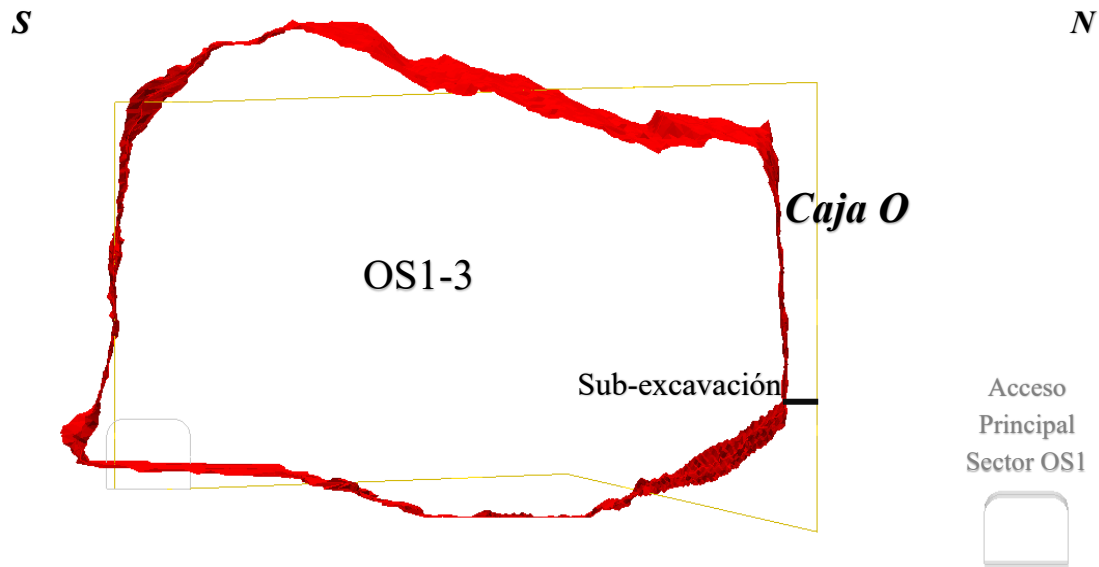


Figura 6.2. Morfología real del caserón OS1-3 y la caja estudiada O (no a escala).

Un caso similar ocurre para la sección o caja estudiada Q, la cual corresponde a la pared Norte del caserón OS1-4, ya que tampoco se evidencia la existencia de sobre-excavación, por lo que es apropiado afirmar que a la fecha aún no se ha activado el desprendimiento de alguna de alguna de sus cuatro cuñas críticas determinadas (véase Figura 6.3).

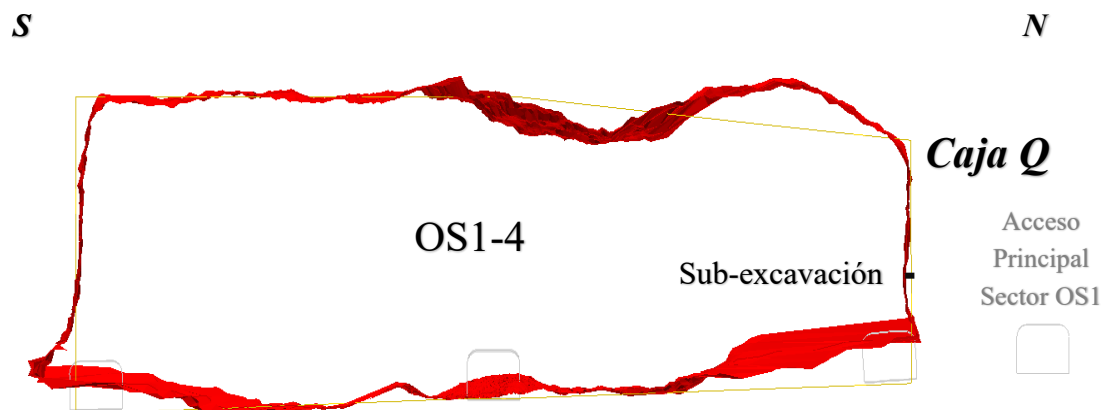


Figura 6.3. Morfología real del caserón OS1-4 y la caja estudiada Q (no a escala).

Lo no activación de estas cuñas se asocia a que sus factores de seguridad no eran del todo bajos, ya que eran de 1.3, para el caso de las cuñas de la caja O, y 1.2 para las de la caja Q, valores que se acercan al considerado como estable. Por otro lado, es importante volver a recalcar la sobreestimación de las persistencias de las discontinuidades consideradas en los análisis determinísticos (infinitas según se estableció), ya que el no desprendimiento de estas cuñas se explicaría debido estas, en lo real, estarían formadas por continuidades más cortas y limitadas.

Finalmente, en la figura 6.3 se puede observar, mediante la comparación del escáner de morfología real con respecto al isométrico de diseño del caserón OS1-13, que existe una sobre-excavación de 3 metros aproximadamente en la parte superior de la sección o caja estudiada A (pared Este del caserón OS1-13), la cual también se puede asociar al desprendimiento de alguna de las cuñas identificadas como sensibles por el análisis determinístico. Se destaca que tanto el ápice, como el volumen desprendido en esta sobre-excavación existente es mucho menor al de las cuñas establecidas por el análisis.

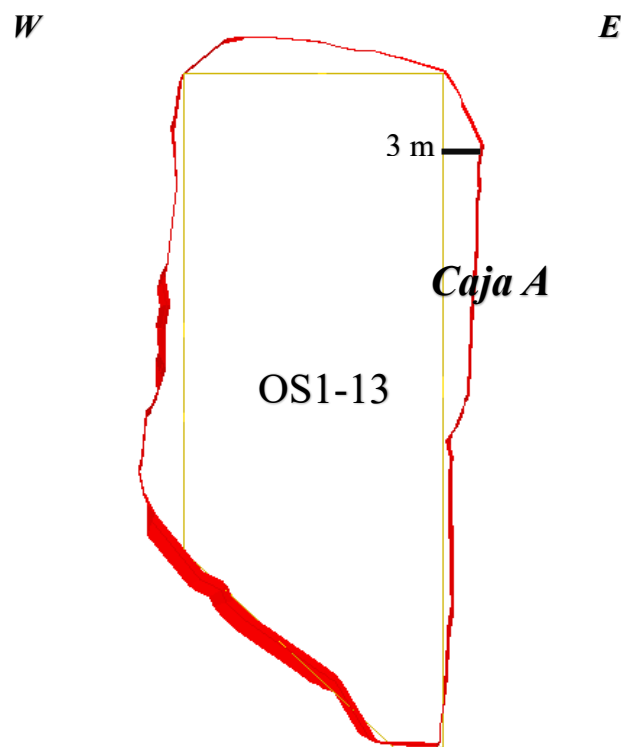


Figura 6.4. Morfología real del caserón OS1-13 y la caja estudiada A (no a escala).

Este análisis presentado como resultado cumple con el objetivo enunciado en el presente estudio de evaluar el estado actual de estabilidad de las cuñas identificadas como inestables, en base a la morfología topográfica real de las excavaciones ya explotadas.

6.3 Recomendaciones

Con la finalidad de robustecer y afinar la aplicación del trabajo realizado, velar por la seguridad y continuidad operacional del proceso minero a efectuarse en el sector OS1 de Atacama Kozan, y dar cumplimiento al objetivo enunciado en el presente estudio de establecer alertas geotécnicas preventivas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

1. Realizar ensayos de mecánica de rocas relacionados al estudio de estructuras geológicas en los sectores productivos de interés, de tal manera de manejar parámetros geomecánicos con valores certeros y ajustados a la realidad de la mina (ángulo de fricción estructural y resistencia a la cohesión).
2. Planificar en el sector de estudio un método y secuencia de extracción mineral adecuado y seguro, basado en los puntos de “Precaución geomecánica” determinados y a la no exposición directa antes las cuñas sensibles. Se sugiera una extracción en retroceso de las unidades productivas, de tal manera que a medida que avance el proceso minero se vaya generando un distanciamiento a las cavidades formadas.
3. Implementar monitoreo geotécnico enfocado a la estabilidad de los pilares de roca afectados por las cuñas, y ubicados en los puntos de “Precaución geomecánica”.
4. Actualizar, de manera general en el sector de estudio, el sostenimiento y fortificación de los principales tramos de tránsito de personal y maquinaria, especialmente aquellos que estén afectados por alguna de las cuñas sensibles establecidas.
5. Mantener de manera constante los controles y levantamientos estructurales en terreno, a modo de realizar un seguimiento a la activación de cuñas críticas determinadas por este estudio, y robustecer el modelo geológico estructural de la zona.

7 CONCLUSIONES

El análisis geométrico estructural y cinemático de cuñas realizado en el sector OS1 de SCM Atacama Kozan permitió una identificación detallada de configuraciones desfavorables asociadas a la interacción entre diaclasas y fallas, tanto mayores como menores. La metodología utilizada, que combinó modelamientos determinísticos y probabilísticos mediante el *software* Unwedge, demostró ser eficaz en la predicción de posibles escenarios de inestabilidad estructural en caserones y pilares.

Se adoptó un umbral conservador de seguridad ($FS < 1.4$), lo cual facilitó la identificación precisa de configuraciones con mayor probabilidad de activación. La mayoría de las cuñas analizadas superaron dicho umbral, lo que sugiere una condición estructural en general favorable, aunque ciertas combinaciones específicas evidenciaron una probabilidad moderada de activación.

El uso de herramientas como Vulcan, AutoCAD y Excel fue fundamental para complementar el análisis, ya que permitió organizar la información estructural, validar las geometrías modeladas y sistematizar los resultados correspondientes a cada una de las cajas evaluadas. Esta integración tecnológica aseguró una gestión de datos precisa, eficiente y con trazabilidad.

Los resultados obtenidos en el total de cajas seleccionadas han permitido identificar zonas críticas que requieren intervención geotécnica prioritaria, al presentar mayores volúmenes de cuñas o factores de seguridad más bajos. Esta información representa una base sólida para planificar adecuadamente el sostenimiento, implementar sistemas de monitoreo geotécnico y optimizar la asignación de recursos en terreno.

Este estudio aporta una metodología replicable que puede ser aplicada a otras áreas del yacimiento o a contextos mineros con características similares, ofreciendo una secuencia estructurada de levantamiento, modelamiento y evaluación para la detección temprana de riesgos geotécnicos en minería subterránea.

Sin desmedro de lo anterior, se resalta la importancia de abordar las limitaciones del estudio ejecutado, relacionadas principalmente al déficit de parámetros geomecánicos-

estructurales validados por ensayos de mecánica de roca, de tal manera que los resultados de los modelamientos se ajusten de manera más cercana al comportamiento geotécnico real del macizo rocoso.

Este trabajo no asegura por sí solo la estabilidad y factibilidad operativa del sector de estudio, sino que debe ser considerado como un complemento a un estudio de estabilidad geomecánico de cámaras y labores a nivel de ingeniería de detalle, mediante el empleo de metodologías empíricas universales y modelamiento número basado en alguno de los métodos existentes y que se emplean en minería para simular la naturaleza geomecánica del macizo.

8 REFERENCIAS

Arévalo, C., 1999. The Coastal Cordillera/Precordillera Boundary in the Tierra Amarilla area (27°20'-27°40'S/70°05'-70°20'W), northern Chile, and the structural setting of the Candelaria Cu-Au ore deposit. Doctoral Tesis. Kingston University, 364 p.

Arévalo, C., 2005. Carta Los Loros, región de Atacama, escala 1:100000. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.

Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Pringle, M., Taylor, G., 2006. Structural Setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au deposit, Chilean Andes (27°30' S). *Economic Geology*, 101, 819-841.

Biese-Nickel, W., 1942. La distribución del Cretácico Inferior al sur de Copiapó. An. Primer Cong. Panam. Ing. Min. Geol., t. II, 429-466.

Bieniawski, Z., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, New York, 272 p.

Campos, F., Mora, R., Sequeira-Arguedas, J., Garnier-Villarreal, M., 2022. Aplicación de análisis de admisibilidad cinemática y equilibrio límite para optimizar la geometría de explotación de una cantera en el cantón de León Cortés, San José, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 66, 1-25.

Corral, F., Pardo, C., 2019. Evaluación de estabilidad en labores subterráneas considerando influencia del agua. *Revista Tecnológica ESPOL*, 32(4), 45-53.

del Real, I., 2019. Lithological, structural and hydrothermal evolution of the Candelaria-Punta del Cobre iron oxide-Cu-Au district, northern Chile. Doctoral Tesis. Universidad de Cornell, 262 p.

E-Mining Technology, 2008. Informe extendido de caracterización del macizo rocoso, mina subterránea Atacama Kozan. Informe inédito. Tierra Amarilla, Chile, 31 p.

Espinoza, S., 1990. The Atacama-Coquimbo ferriferous belt, northern Chile. In: Fontboté L, Amstutz GC, Cardozo M, Cedillo E, Frutos J (eds) *Stratabound ore deposits in the Andes*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 353-364.

FF-Geomechanics, 2021. Informe compilatorio de estudio geotécnicos y geomecánicos del sector Kou, mina Atacama Kozan. Informe inédito. Tierra Amarilla, Chile, 130 p.

FF-Geomechanics, 2024. Estudios geotécnicos y geomecánicos del sector Farellones, mina Atacama Kozan. Informe inédito. Tierra Amarilla, Chile, 1028 p.

Flores, G., Karzulovic, A., 2003. Geotechnical guidelines for a transition from open pit to underground mining, ICS–II Caving Study, Task 4, 117 p.

Hoek, E., Brown, E., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.

Hoek, E., Bray, J., 1981. *Rock slope engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, 3rd edition, 360 p.

Hoffstetter, R., Fuenzalida, H., Cecioni, G., 1957. *Lexique Stratigraphique International*. *Amerique Latine*, 5, 444 p.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2006. *Manual de Ingeniería de Taludes* Ministerio de Educación y Ciencia, 456 p.

Li, S., Wang, L., Liu, H., Zhang, Q., 2020. Three-dimensional analysis of wedge stability in underground openings: Integrating probabilistic and deterministic methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, Art. 103312.

Marschik, R., Leveille, R., Martín, W., 2000. La Candelaria and the Punta del Cobre District, Chile: Early Cretaceous Iron-Oxide Cu-Au (-Zn-Ag) Mineralization. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*. PGC Publishing, 1, 163-175.

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Deckart, K., Charrier, R., 2016. Tectonic styles and crustal shortening of the Central Andes “Pampean” flat-slab segment in northern Chile (27–29°S). *Tectonophysics*, 667, 144-162.

Mateos, R., Ferrer, M., González de Vallejo, L., 2002. Los materiales rocosos de la Sierra Tramuntana, Mallorca, España. Caracterización geomecánica y clasificación geotécnica. *Boletín Geológico y Minero*, 113(4), 415-427.

Palmström, A., 2005. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 362-377.

Pérez, P., 2019. Estudio petrográfico, mineralógico y estructural de las unidades de andesitas superiores y el manto mineralizado del sector norte de la Sociedad Contractual Minera Atacama Kozan, Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile. Tesis de pregrado de Geología. Universidad de Atacama, 110 p.

Pino, F., 2025. Caracterización petrográfica y geotécnica de la unidad geotécnica 5 en los sectores Esperanza, Haru y Farellones inferior, Mina S.C.M Atacama Kozan, Tierra Amarilla, Chile. Tesis de pregrado de Geología. Universidad de Atacama, 106 p.

Ramírez, P., De la Cuadra, L., Laín, R., Grijalbo, E., 1984. *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. IGME, 362 p.

Rocscience Inc., 2023. Unwedge – 3D Wedge Stability Analysis for Underground Excavations. Recuperado de <https://www.rocscience.com>.

Rodríguez, D., Castaño, L., Carvajal, Y., 2017. Estudio geomecánico aplicado a minería subterránea: análisis de estabilidad por cuñas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(30), 78–91.

Romana, M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*. ISRM, 49-53.

Segerstrom, K., Parker, R., 1959. Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama: Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, *Carta Geológica de Chile*, 1(2), 33 p.

Segerstrom, K., 1960. Structural Geology of an area east of Copiapó, Atacama Province, Chile. *Reports XXI International Geological Congress, Part XVIII*, 14-20.

Segerstrom, K. Ruiz, C. (1962). *Geología del Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama*. Instituto de Investigaciones Geológicas, *Carta Geológica de Chile*, vol. 3.

Singh, B., Goel, R., 2011. Chapter 11 – Rate of Tunneling, *Engineering Rock Mass Classification: Tunneling, Foundations, and Landslides*, 145-157.

Solís, D., 2016. Litología, alteración y mineralización de la unidad de explotación del yacimiento Atacama Kozan, III región de Atacama, Chile. Tesis de pregrado de Geología. Universidad de Atacama, 88 p.

Sönmez, H., Gökceoglu, C., Zorlu, K., 2017. A practical procedure for the assessment of wedge failure risk in underground excavations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1), 249-258.

Tilling, R., 1962. Batholith emplacement and contact metamorphism in the Paipote-Tierra Amarilla area, Atacama Province, Chile. Unpublished PhD Thesis, Yale University, Newhaven, Connecticut, 195 p.

Torres, J., Morales, H., Alvarado, P., 2016. Análisis de estabilidad de excavaciones subterráneas mediante clasificación geomecánica y modelamiento numérico. *Revista DYNA*, 83(197), 43-51.

Wang, H., Li, Y., Zhang, C., 2018. Geotechnical risk assessment in underground mines using wedge failure analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108, 130-139.

Zelada, R., 2017. Diseño de sostenimiento para proyecto de túnel desarrollado por TBM. Tesina de sustentación de diplomado de geomecánica subterránea y superficial. Centro Geotécnico Internacional, 51 p.

9 ANEXOS

1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989).

A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN Y SUS RATINGS									
Parámetros			Rango de valores						
1	Resistencia de la Roca Intacta	Resistencia compresión uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento de Discontinuidades		> 2m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condición de Discontinuidades (Jc)	Largo (Persistencia)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Rating	6	4	2	1	0		
		Separación (Apertura)	Ninguna	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Rating	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Lig. Rugosa	Suave	Espejo Falla		
Rating	6	5	3	1	0				
Relleno	Ninguno	Duro < 5mm	Duro > 5mm	Blando < 5mm	Blando > 5 mm				
Rating	6	4	3	2	0				
Alteración	No alterada	Escasa	Moderada	Fuerte	Descompuesto				
Rating	6	5	3	1	0				
5	Agua Subterránea	Flujo por 10 m longitud de túnel (l/m)	Ninguno	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Presión agua en diaclasas / Esfuerzo Principal	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condiciones generales	Seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
		Rating	15	10	7	4	0		
B. AJUSTE DE RATING POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES									
Orientación de rumbo y manto			Muy Favorable	Favorable	Moderado	Desfavorable	Muy Desfavorable		
Ratings	Túneles		0	-2	-5	-10	-12		
	Fundaciones		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50			
C. CLASES DEL MACIZO ROCOSO DETERMINADAS DESDE LOS RATINGS TOTALES									
Rating			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<21		
Número de Clase			I	II	III	IV	V		
Calidad Geotécnica			Muy Buena	Buena	Regular	Mala	Muy Mala		
D. SIGNIFICADO DE LAS CLASES DEL MACIZO ROCOSO									
Número de Clase			I	II	III	IV	V		
Tiempo promedio de sostenimiento			20 años para 15m claro	1 año para 10 m claro	1 sem para 5m claro	10 hrs para 2,5m claro	30 min para 1 m claro		
Cohesión Macizo Rocoso (kPa)			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
ϕ_r			>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°		

ϕ_r = Ángulo de Fricción Interna del Macizo Rocoso

Tabla 9.1. Parámetros y valores asociados a la determinación del índice geotécnico de RMR_B . Modificado de Bieniawski, 1989.

2. Plano de análisis geométrico estructural del sector OS1, S.C.M. Atacama Kozan.

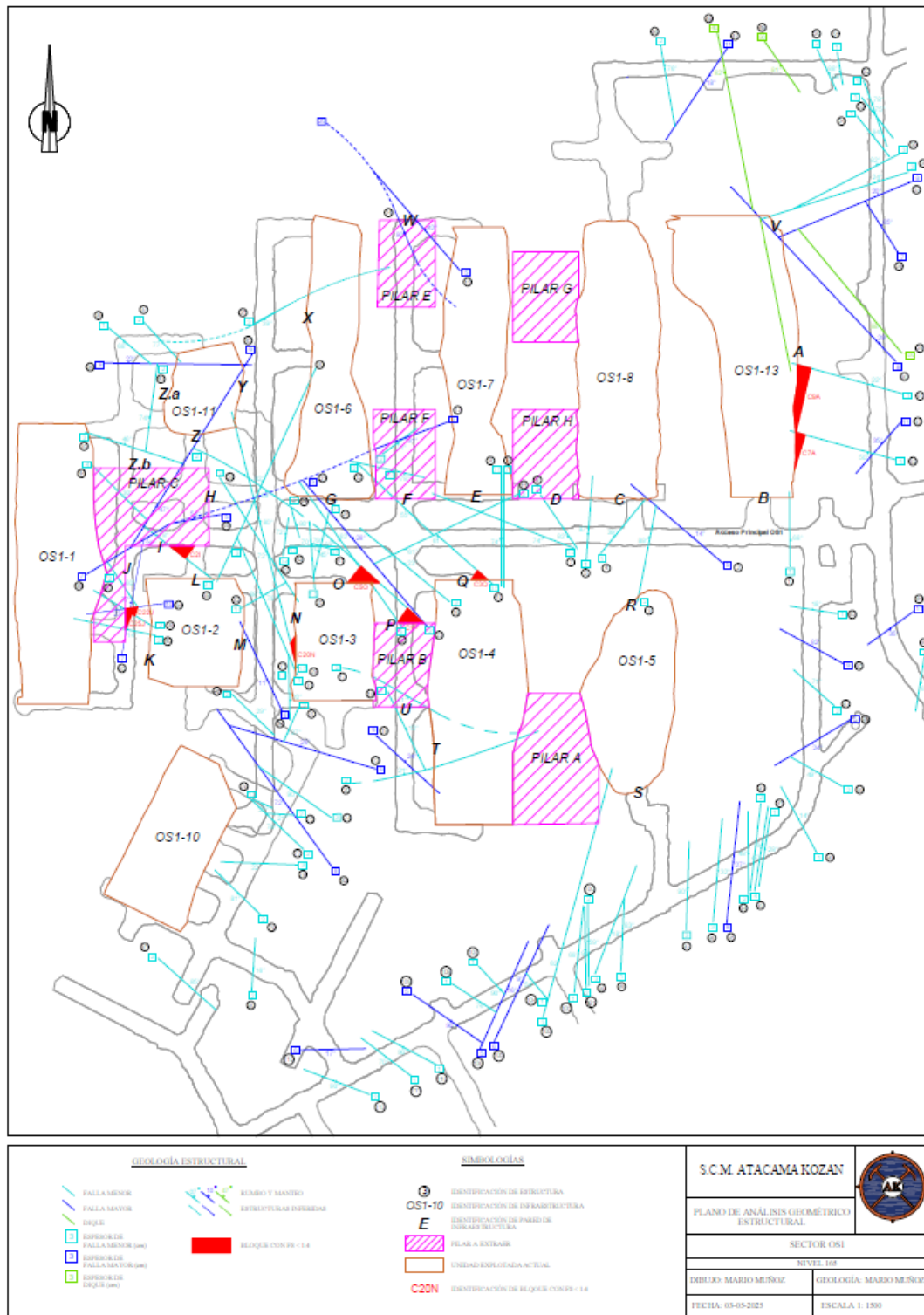


Figura 9.1. Plano oficial de análisis geométrico estructural del sector OS1, S.C.M. Atacama Kozan (no a escala). Elaboración propia.

3. Plano de análisis geométrico estructural del Acceso principal al sector productivo OS1, S.C.M. Atacama Kozan.

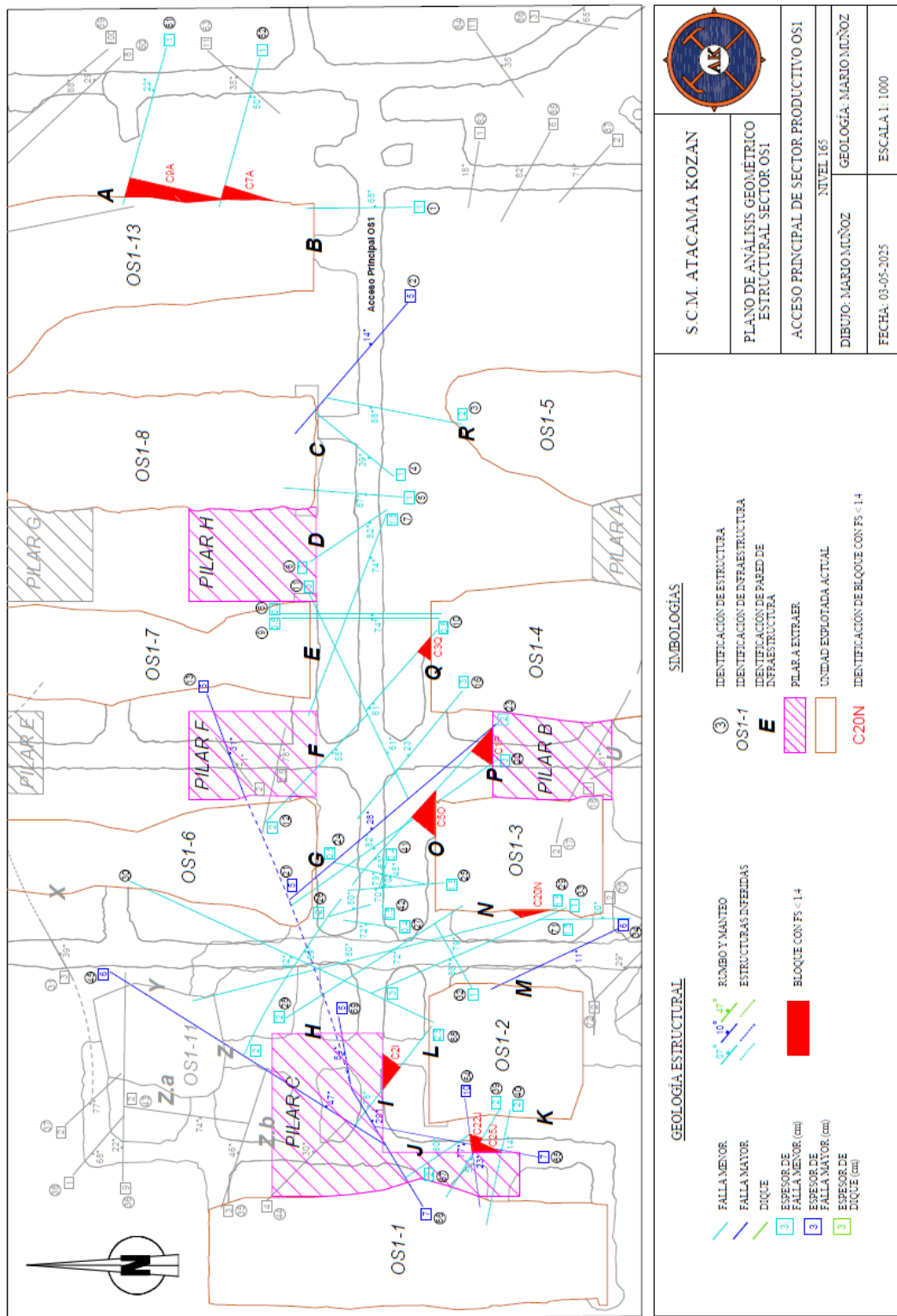


Figura 9.2. Plano oficial de análisis geométrico estructural enfocado al Acceso principal del sector productivo OS1, S.C.M. Atacama Kozan (no a escala). Elaboración propia.