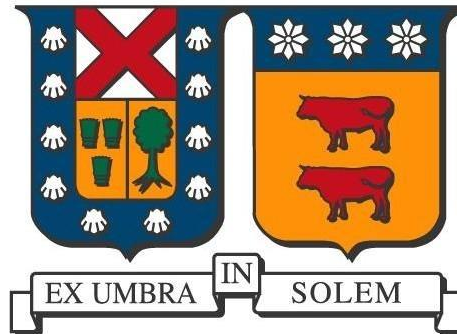


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS, METALURGIA Y
MATERIALES



**Metodología para la priorización de interacciones vehiculares y
orientación preventiva basada en el uso del sistema CAS en minería a
cielo abierto**

Mauricio Fernando Zúñiga Tobar

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

Gonzalo Nelis

Profesor Co-guía

Jecar Arroyo

2026

Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Metodología para la priorización de interacciones vehiculares y orientación preventiva basada en el uso del sistema CAS en minería a cielo abierto

Nombre del candidato(a): Mauricio Fernando Zúñiga Tobar

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: San Joaquín

Departamento: Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gonzalo Nelis Suazo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 19.10.2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16-10-2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

A mis padres, Sandra Tobar y Rafael Zúñiga, y a mis hermanos, Leonardo Lazo y Felipe Zúñiga, por ser parte de mi vida desde pequeño y de la historia que me ha traído hasta aquí. Este logro también forma parte del camino que hemos compartido como familia.

De manera muy especial, a mi perrito Atom, por su compañía, su cariño y tantos momentos compartidos. Gracias por hacer más llevaderos los días difíciles y por ocupar un lugar tan especial en mi vida. Tu recuerdo me acompaña también en este logro.

A Camila Mira, gracias por tu cariño y por acompañarme en la etapa final de este proceso. Gracias por escucharme y por compartir conmigo este momento tan importante.

A mis amistades, especialmente a Tamara, Javiera, Sofía, Fernanda y Pablo, y a todas aquellas que han sido parte de este camino, gracias por su compañía, por escucharme y por los momentos compartidos durante estos años.

Finalmente, agradezco a todas las personas que en algún momento me apoyaron durante este proceso. Cada gesto de ayuda, compañía y ánimo significó mucho para mí.

Resumen

Palabras clave: sistema CAS, interacciones vehiculares, minería a cielo abierto, criticidad potencial, gestión preventiva.

La gestión preventiva de interacciones vehiculares en minería a cielo abierto requiere transformar los registros generados por sistemas tecnológicos en antecedentes útiles para la toma de decisiones. Este trabajo desarrolla y aplica una metodología orientada al aprovechamiento preventivo de los registros del sistema Collision Avoidance System de Hexagon. El estudio se aplica en cuatro faenas mineras a cielo abierto anonimizadas, analizadas en una ventana nominal de seis meses.

Los registros históricos CAS son depurados, consolidados y contextualizados de forma espacial y operacional para reconocer patrones relevantes de interacción. Posteriormente, los eventos son clasificados según niveles de criticidad potencial, considerando criterios geométricos, composición del par de equipos, condición de velocidad y severidad temporal CAS. Sobre esta base se analizan las condiciones bajo las cuales se presentan las interacciones de mayor criticidad potencial, reconociendo diferencias entre los contextos operacionales analizados.

Los resultados muestran que la metodología permite transformar alertas históricas en antecedentes trazables y priorizables, útiles para apoyar la revisión operacional, diferenciar condiciones de mayor interés preventivo y orientar la priorización en seguridad operacional.

Abstract

Keywords: CAS system, vehicle interactions, open-pit mining, potential criticality, preventive management.

Preventive management of vehicle interactions in open-pit mining requires transforming records generated by technological systems into useful inputs for decision-making. This study develops and applies a methodology oriented toward the preventive use of records generated by Hexagon's Collision Avoidance System. The study is applied to four anonymized open-pit mining operations analyzed over a nominal six-month period.

Historical CAS records are cleaned, consolidated, and spatially and operationally contextualized to identify relevant interaction patterns. Events are then classified according to levels of potential criticality, considering geometric criteria, equipment-pair composition, speed condition, and CAS temporal severity. On this basis, the conditions under which higher-potential-criticality interactions occur are analyzed, identifying differences among the operational contexts considered.

The results show that the methodology enables historical alerts to be transformed into traceable and prioritizable inputs, useful for supporting operational review, differentiating conditions of greater preventive interest, and guiding prioritization in operational safety.

Tabla de contenido

1.	Introducción	10
1.1.	Planteamiento del problema.....	10
1.2.	Objetivos y alcances	12
1.2.1	Objetivo general.....	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
1.2.3	Alcances	12
2.	Marco Teórico	13
2.1.	Seguridad operacional y riesgo asociado a equipos móviles en minería a cielo abierto	13
2.2.	Sistema de advertencia de colisiones en minería.....	14
2.3.	Gestión del tránsito minero y modelo EMESRT.....	17
2.4.	Capacidades organizacionales y tecnológicas para el aprovechamiento de datos CAS	18
2.5.	Información cuantitativa y variables operacionales para la caracterización de interacciones	19
3.	Metodología.....	21
3.1.	Diseño general de la metodología propuesta	21
3.2.	Metodología de tratamiento de datos operacionales	21
3.2.1	Identificación de variables relevantes.....	22
3.2.2	Validación y estandarización inicial	23
3.2.3	Definición de criterios de consolidación y jerarquía operacional.....	24
3.2.4	Control de duplicado y consolidación temporal de registros.....	25
3.2.5	Construcción de atributos geométricos del encuentro.....	26
3.3.	Metodología de contextualización operacional de eventos CAS.....	27
3.3.1	Construcción de malla espacial.....	29
3.3.2	Caracterización de concentración de eventos por celda	30
3.3.3	Caracterización de velocidad operacional por celda	30
3.3.4	Delimitación del Contexto Analítico de Interacción	31

3.4.	Metodología de clasificación de eventos CAS	32
3.4.1	Criticidad geométrica de la interacción.....	34
3.4.2	Criticidad según composición del par de equipos.....	34
3.4.3	Velocidad de referencia y condición de velocidad	35
3.4.4	Categoría temporal Time to Collision	35
3.4.5	Asignación del nivel de criticidad potencial	36
3.5.	Metodología de análisis integrado de resultados.....	38
3.5.1	Caracterización de la base analítica efectiva	39
3.5.2	Análisis de criticidad potencial y contextos de interacción.....	40
3.5.3	Identificación de patrones de interacción por celda.....	41
4.	Caso de estudio.....	42
5.	Resultados.....	44
5.1.	Alcance de la base analítica.....	44
5.2.	Distribución de criticidad potencial y contextos de interacción.....	48
5.3.	Patrones de interacción y orientación preventiva	51
6.	Discusión	58
7.	Conclusión.....	59
8.	Referencias	60
9.	Anexo	63
9.1.	Encuesta de Reportabilidad y Uso Operacional del CAS	63
9.2.	Encuesta de Capacitación y Gestión de Soporte del CAS.....	66
9.3.	Agrupación de preguntas por dimensión analítica	68
9.4.	Matriz de codificación de respuestas.....	68
9.4.1	Clasificación de preguntas según tipo de codificación.....	68
9.4.2	Codificación de escalas utilizadas.....	68
9.5.	Variables de origen utilizadas del dataset CAS	70
9.6.	Variables derivadas utilizadas en el análisis	71
9.7.	Clases de interacción utilizadas en la clasificación EMESRT	72

Índice de figuras

Figura 1: Componentes embarcados del sistema HxGN MineProtect CAS 10: antena QC1000 y pantalla QD1400. Fuente: Documentación interna de Hexagon, proporcionada para este estudio.	15
Figura 2: Representación del entorno vehicular y generación de advertencias en el sistema HxGN MineProtect CAS 10. Fuente: Documentación interna de Hexagon, proporcionada para este estudio.	16
Figura 3: Generación, almacenamiento y transferencia de información del sistema CAS 10. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 4: Diseño general de la metodología propuesta para transformar registros históricos CAS en indicadores de gestión operacional. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 5: Metodología de tratamiento de datos operacionales CAS. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 6: Metodología de contextualización operacional de eventos CAS. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 7: Metodología de clasificación de eventos CAS según criticidad potencial. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 8: Metodología de análisis integrado de resultados. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 9: Distribución de eventos de Nivel 2 y Nivel 3 según Contexto Analítico de Interacción por faena. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 10: Comportamiento de la condición de velocidad en los distintos contextos operacionales. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 11: Organización espacial de los patrones de interacción en sectores seleccionados de las faenas. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 12: Caracterización operacional de los patrones de interacción según contexto y composición de equipos. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 13: Caracterización temporal y cinemática de los patrones de interacción. Fuente: Elaboración propia.	55

Índice de tablas

Tabla 1: Variables relevantes utilizadas en el tratamiento de registros CAS. Fuente: Elaboración propia.....	23
Tabla 2: Criterios de validación y estandarización inicial de los registros CAS. Fuente: Elaboración propia.....	23
Tabla 3: Jerarquía operacional de tipos de equipo utilizada en la consolidación de registros recíprocos. Fuente: Elaboración propia.....	24
Tabla 4: Reglas de clasificación geométrica de interacciones vehiculares según EMESRT. Fuente: Adaptado de Dantas et al. (2025).	26
Tabla 5: Contextos Analíticos de Interacción definidos a partir de la concentración de eventos y velocidad media por celda. Fuente: Elaboración propia.	31
Tabla 6: Criticidad geométrica asociada a las clases de interacción. Fuente: Elaboración propia, adaptado de EMESRT y Dantas et al. (2025).	34
Tabla 7: Matriz de criticidad base según composición del par de equipos. Fuente: Elaboración propia.....	34
Tabla 8: Niveles de criticidad potencial de eventos CAS. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 9: Criterios para la caracterización de la base analítica efectiva. Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 10: Criterios para el análisis de criticidad potencial y Contextos Analíticos de Interacción. Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 11: Perfil de gestión declarada del sistema CAS por faena. Fuente: Elaboración propia.	42
Tabla 12: Trazabilidad de la base de análisis desde los registros CAS hasta los eventos elegibles. Fuente: Elaboración propia.	44
Tabla 13: Origen de la reducción de registros durante la construcción de la base analítica. Fuente: Elaboración propia.	44
Tabla 14: Limitaciones de información que condicionan la elegibilidad para la clasificación de criticidad potencial. Fuente: Elaboración propia.	45
Tabla 15: Origen de las exclusiones asociadas a la clasificación geométrica. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 16: Continuidad y estabilidad temporal de los registros CAS durante la ventana de análisis. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 17: Distribución de eventos CAS según nivel de criticidad potencial por faena. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 18: Agrupación de preguntas por dimensión analítica. Fuente: Elaboración propia.	68
Tabla 19: Clasificación de preguntas según tipo de codificación. Fuente: Elaboración propia...	68

Tabla 20: Codificación de escalas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.	68
Tabla 21: Variables de origen utilizadas del dataset CAS. Fuente: Elaboración propia.	70
Tabla 22: Variables derivadas utilizadas en el análisis. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 23: Clases de interacción utilizadas en la clasificación EMESRT. Fuente: Elaboración propia.....	72

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La minería a cielo abierto es una actividad de alto riesgo operacional debido a las complejas condiciones en que se desarrollan sus faenas. A pesar de que el sector representa menos del 1% de la fuerza laboral a nivel mundial, concentra aproximadamente el 8% de las muertes asociadas al trabajo (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2015). De acuerdo con la OIT (2018), algunas de las causas identificadas son la presencia de equipos móviles de gran tamaño, posibles inestabilidades de terreno, condiciones climáticas adversas y ambientes con baja visibilidad por polvo o iluminación deficiente. En particular, la interacción constante entre vehículos intensifica estos riesgos debido a factores como puntos ciegos, visibilidad limitada, fatiga de los operadores y convivencia entre equipos de distintas dimensiones.

Según Bellanca et al. (2021), en fatalidades asociadas a camiones mineros, muchos eventos se relacionan con pérdida de conciencia situacional o de control, además de factores de diseño y organización. En este sentido, medidas tradicionales como la señalización, la segregación de vías o la definición de reglas de tránsito son necesarias, pero no siempre suficientes para prevenir interacciones vehiculares de alto potencial. Por ello, se han incorporado diversas tecnologías de apoyo a la seguridad operacional, tales como sistemas de monitoreo de fatiga, sistemas de gestión de flotas, cámaras de apoyo a la conducción, sensores de proximidad, sistemas de detección de personas y Collision Avoidance Systems (CAS), orientados a detectar condiciones de proximidad o trayectorias potencialmente conflictivas entre equipos móviles.

Este estudio se centra en el sistema Collision Avoidance System de Hexagon, el cual utiliza información de posicionamiento, comunicación entre equipos y reglas de proximidad para detectar interacciones operacionales y emitir alertas. Además de su función inmediata de advertencia en tiempo real, el sistema registra eventos con información temporal, espacial, operacional, cinemática y de severidad, lo que habilita la trazabilidad y el análisis posterior de las interacciones detectadas.

En Chile, la seguridad en las operaciones mineras se encuentra regulada por el Reglamento de Seguridad Minera, DS 132, el cual establece exigencias asociadas al tránsito de vehículos y personas, al carguío y transporte de material, y a la operación segura de equipos en faenas mineras. En este marco, algunas faenas han incorporado sistemas CAS en sus estándares o normativas internas de tránsito, como una medida complementaria para reforzar la gestión preventiva de interacciones entre equipos.

Hrica et al. (2022) señalan que la literatura sobre tecnologías de advertencia de colisiones en minería se ha concentrado principalmente en sensores, prototipos y niveles de madurez tecnológica, con menor evidencia sobre sistemas completos evaluados en condiciones operacionales reales. Sin embargo, existen pocos estudios sobre cómo aprovechar los registros que estos sistemas generan luego de ser implementados.

En las faenas que cuentan con sistemas CAS instalados, los registros históricos pueden quedar subutilizados si se revisan únicamente como reportes aislados, conteos de alertas o antecedentes posteriores a eventos específicos. Para que estos registros aporten a la gestión, deben ser preparados, contextualizados y clasificados, de modo que permitan reconocer las condiciones bajo las cuales se producen las interacciones de mayor criticidad.

En este contexto, la presente memoria propone y aplica una metodología que utiliza los registros históricos del sistema CAS de Hexagon, con el propósito de transformar estos registros en antecedentes trazables e indicadores útiles para apoyar la priorización y revisión preventivas en minería a cielo abierto.

1.2. Objetivos y alcances

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar y aplicar una metodología para transformar registros históricos del sistema CAS en antecedentes operacionales priorizables, mediante la contextualización y clasificación de eventos de interacción vehicular con el fin de apoyar su uso preventivo en minería a cielo abierto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Establecer criterios de preparación, integridad y trazabilidad de registros históricos CAS que permitan construir una base analítica adecuada para su contextualización, clasificación y uso preventivo.
- Desarrollar un procedimiento de contextualización y clasificación de eventos CAS que permita diferenciar condiciones de recurrencia operacional y niveles de criticidad potencial.
- Analizar la evidencia operacional obtenida desde los registros CAS, con el fin de generar antecedentes que apoyen la priorización y revisión preventiva en seguridad operacional.

1.2.3 Alcances

- El estudio se centra en el sistema Collision Avoidance System de Hexagon, aplicado en faenas de minería a cielo abierto. El análisis se desarrolla a partir de registros históricos de alertas CAS.
- La aplicación metodológica considera faenas mineras a cielo abierto tratadas de manera anonimizada. Los resultados se presentan a nivel de faena codificada, sin identificar empresas, operaciones, equipos, usuarios, ubicaciones específicas ni otros antecedentes que permitan reconocer los contextos analizados.
- Los registros CAS se utilizan como evidencia operacional indirecta, por lo que las alertas analizadas no se interpretan como accidentes, incidentes consumados ni consecuencias materializadas. Asimismo, no se dispone de antecedentes sobre diseño de caminos, plan de tránsito, procedimientos operacionales ni registros de incidentes, por lo que los resultados se orientan a la priorización y revisión preventiva, sin establecer causas ni evaluar los controles existentes.

2. Marco Teórico

2.1. Seguridad operacional y riesgo asociado a equipos móviles en minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto se desarrolla en un entorno operacional de alta complejidad, donde las condiciones de riesgo son diversas, debido a que la operación depende del desplazamiento permanente de equipos móviles de gran tamaño, vehículos livianos, maquinaria auxiliar y personal de apoyo que interactúan en espacios que cambian con el avance del rajo y con la ubicación de frentes de carguío, botaderos, talleres, caminos, rampas e intersecciones.

Desde esta perspectiva, la seguridad operacional debe abordarse como un problema propio de sistemas complejos, y no únicamente como la ausencia de accidentes o como el incumplimiento formal de procedimientos. Los eventos graves suelen originarse en la combinación de factores técnicos, humanos, ambientales y organizacionales. Guenther y Salow (2012) señalan que el aumento del tamaño de los equipos mineros ha incrementado tanto los puntos ciegos como las exigencias cognitivas de los operadores, quienes deben procesar información proveniente de la vía, los sistemas embarcados, las comunicaciones radiales, las señales operacionales y las condiciones cambiantes del entorno. Debido a estas características, la seguridad no puede depender únicamente de la vigilancia individual del operador.

El riesgo asociado a las colisiones de los equipos móviles adquiere especial relevancia debido a la severidad potencial de sus consecuencias y a la exposición frecuente a altos niveles de energía. Moniri-Morad et al. (2024) destacan que las operaciones de transporte y acarreo mediante equipos móviles, denominadas *powered haulage* en la literatura, constituyen uno de los componentes críticos de la seguridad minera, debido a la importancia productiva de estos equipos y a la magnitud de las consecuencias que pueden derivarse de accidentes. Los autores plantean que la gestión de estos riesgos requiere identificar peligros, comprender sus causas, estimar su magnitud y relacionarlos con barreras de control pertinentes. Este enfoque desplaza la discusión desde la existencia del peligro hacia la necesidad de comprender cómo se manifiesta en condiciones operacionales concretas.

El riesgo vehicular se configura en la interacción entre equipos y en las condiciones bajo las cuales se relacionan sus trayectorias. Las configuraciones de encuentro presentan diferencias de visibilidad, anticipación y capacidad de maniobra, por lo que no todas las interacciones representan condiciones de exposición equivalentes.

Desde el año 2000, en Chile se ha registrado una disminución de fatalidad causada por accidentabilidad minera, pero los eventos asociados a vehículos motorizados continúan siendo

una categoría relevante dentro de la fatalidad del sector. De acuerdo con las estadísticas publicadas por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) en 2025, el tránsito minero continúa siendo un desafío relevante para la industria nacional, posicionándose como la tercera mayor causa de decesos por accidente. Un evento vehicular puede presentarse con menor recurrencia que otros tipos de accidentes, pero su severidad potencial justifica una atención preventiva prioritaria.

El análisis tradicional basado en accidentes consumados presenta limitaciones para este tipo de riesgo. Los accidentes fatales o graves son eventos de baja frecuencia, por lo que entregan una base de información limitada y tardía para el aprendizaje preventivo. Además, antes de una colisión suelen existir señales previas, tales como situaciones de proximidad, trayectorias convergentes, advertencias, circulación recurrente en zonas críticas o prácticas operacionales que aumentan la exposición. A pesar de que estas señales no siempre se registran como incidentes formales, reflejan condiciones de riesgo presentes en la operación diaria.

2.2. Sistema de advertencia de colisiones en minería

El HxGN MineProtect CAS 10 de Hexagon corresponde a un sistema embarcado de asistencia al operador, orientado a mejorar la percepción del tránsito y advertir posibles condiciones de colisión entre equipos. Su funcionamiento integra posicionamiento satelital, comunicación directa entre vehículos, procesamiento local, representación del entorno vehicular, generación de advertencias, almacenamiento interno y conectividad con la infraestructura tecnológica de la faena.

El hardware del sistema está compuesto principalmente por una antena QC1000 instalada en el exterior del vehículo y una pantalla QD1400 ubicada en la cabina. La QC1000 concentra las funciones de posicionamiento, comunicación, procesamiento y almacenamiento. Para ello, incorpora un receptor GNSS, un transceptor de radiofrecuencia, capacidad de procesamiento, memoria interna y una unidad de medición inercial. También dispone de conexiones para recibir señales provenientes del vehículo y de módulos de conectividad para transferir información a la red de la faena.

La pantalla QD1400 constituye la interfaz entre el sistema y el operador, presentando una vista del entorno vehicular mediante símbolos que representan los equipos detectados y su posición relativa. Además, comunica las advertencias mediante recursos visuales y acústicos, permitiendo reconocer la dirección desde la cual se aproxima un vehículo o se origina una condición de peligro.



*Figura 1: Componentes embarcados del sistema HxGN MineProtect CAS 10: antena QC1000 y pantalla QD1400.
Fuente: Documentación interna de Hexagon, proporcionada para este estudio.*

Durante la operación, el receptor GNSS permite determinar la posición, velocidad y rumbo del equipo. La obtención de estos antecedentes requiere una recepción adecuada de las señales satelitales, por lo que la antena debe instalarse en una ubicación que reduzca las obstrucciones y mantenga una visibilidad suficiente del cielo. Esta información puede complementarse mediante señales procedentes del vehículo y sensores incorporados en la unidad, los cuales permiten determinar con mayor precisión su estado de movimiento. Con estos antecedentes, cada unidad transmite periódicamente información propia mediante radiofrecuencia y recibe la información emitida por otros vehículos equipados con CAS 10.

En la pantalla, los vehículos circundantes se organizan mediante zonas configurables de proximidad, distribuidas en niveles lejanos, intermedios y cercanos. Estas zonas permiten presentar la distancia relativa de los equipos y facilitar el reconocimiento de unidades que pueden encontrarse fuera del campo visual directo del operador. Por otro lado, la generación de una advertencia incorpora la evaluación del movimiento relativo entre los vehículos, de forma tal que, si se identifica un equipo cercano, este se presentará en pantalla sin generar una alerta de colisión, mientras que una unidad ubicada inicialmente a mayor distancia puede presentar una condición de mayor atención cuando su velocidad y rumbo producen una trayectoria convergente.

A partir de los datos intercambiados, el CAS 10 evalúa la evolución inmediata de la interacción y determina si corresponde emitir una advertencia al operador. El nivel de advertencia aumenta conforme disminuye el margen temporal estimado. Ante su activación, el operador debe responder de acuerdo con el contexto y los procedimientos de la faena, mediante acciones como reducir la velocidad, detener el vehículo o modificar su trayectoria.

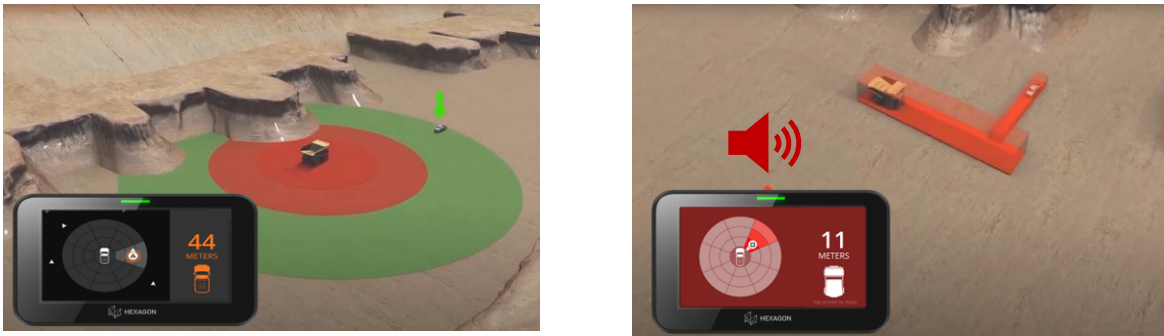


Figura 2: Representación del entorno vehicular y generación de advertencias en el sistema HxGN MineProtect CAS 10. Fuente: Documentación interna de Hexagon, proporcionada para este estudio.

La configuración del sistema considera las características de los equipos, especialmente sus dimensiones y las zonas de proximidad definidas, permitiendo adaptar su funcionamiento a los distintos tipos de vehículos presentes en la operación.

Además de las advertencias asociadas a posibles riesgos de colisiones, el CAS 10 incorpora funciones relacionadas con el tránsito y la seguridad vehicular, como la detección de exceso de velocidad, el seguimiento a distancia insuficiente, las condiciones de circulación en rampas y las reglas asociadas a zonas configuradas. Según los parámetros establecidos, estas funciones pueden emitir advertencias al operador o generar registros para su revisión. La unidad QC1000 también puede registrar vibraciones detectadas por la unidad de medición inercial y antecedentes sobre el estado de comunicación, conectividad, alimentación y errores internos. La disponibilidad y el nivel de detalle de estos registros dependen de las funciones habilitadas en cada operación.

Una vez generados, los registros permanecen en la unidad CAS hasta que el equipo dispone de conexión con la red de la faena. Cuando se establece conectividad mediante Wi-Fi o LTE, según la implementación de la operación, la información se transfiere hacia un servidor instalado en la faena que recibe los datos, el cual se denomina MPData. Este sistema central también permite distribuir parámetros, configuraciones y actualizaciones, facilitando la administración de las unidades sin intervenir físicamente cada equipo.

En la arquitectura considerada, la información recibida por MPData pasa posteriormente por procesos internos de integración y queda disponible en una base de datos implementada en SQL Server. Desde la cual se pueden consultar y extraer registros históricos para procesos de revisión, reportabilidad y análisis.

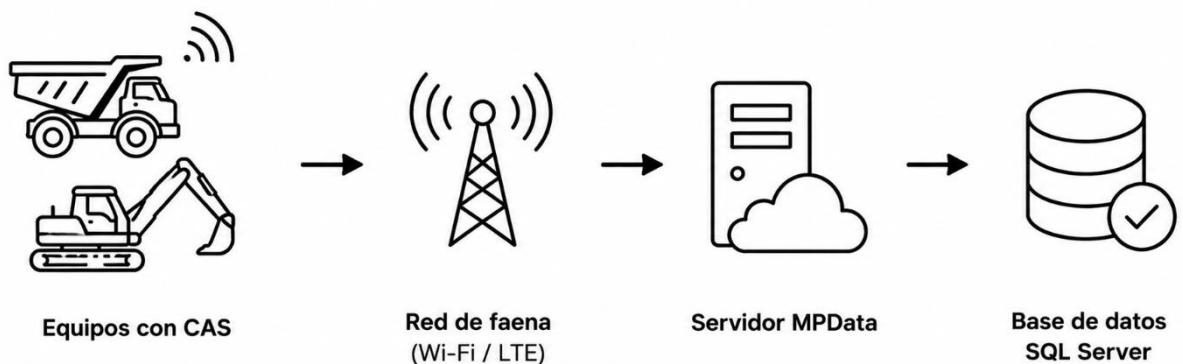


Figura 3: Generación, almacenamiento y transferencia de información del sistema CAS 10. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Gestión del tránsito minero y modelo EMESRT

La gestión del tránsito minero corresponde al conjunto de reglas, controles y condiciones operacionales utilizadas para organizar la circulación de equipos, vehículos y personas dentro de la faena, comprendiendo la definición de rutas, prioridades, zonas de operación, velocidades, segregación y condiciones de visibilidad.

Un plan de tránsito minero busca ordenar la circulación y reducir la exposición entre equipos, personas e infraestructura. Su efectividad depende de que las reglas y los controles definidos se apliquen de manera coherente con las condiciones reales de operación y se ajusten cuando estas cambian.

En este contexto, la Earth Moving Equipment Safety Round Table, o EMESRT -por su sigla en inglés-, es una iniciativa global fundada en 2006 que entrega las bases para la gestión de riesgos en maquinaria pesada. Bajo esta mirada, la organización desarrolló el Vehicle Interaction Defensive Controls Model, el cual busca mejorar la confiabilidad de los controles frente a eventos no deseados asociados a equipos móviles. A través de este enfoque, los controles de interacción vehicular se entienden como sistémicos, multiniveles, interconectados y dinámicos, abarcando etapas de diseño, operación, conciencia situacional, advertencia e intervención (Earth Moving Equipment Safety Round Table [EMESRT], s. f.).

Dentro del modelo EMESRT, el funcionamiento del sistema CAS se relaciona principalmente con los niveles 7 y 8 de las capas de defensa frente a interacciones vehiculares, correspondientes a Operator Awareness y Operator Advisory respectivamente, ya que la visualización de los vehículos circundantes en pantalla ayuda a fortalecer la percepción del operador, mientras que la generación de advertencias ante interacciones potencialmente inseguras busca apoyar una respuesta oportuna frente a estas situaciones (Earth Moving Equipment Safety Round Table [EMESRT], s. f.). Además de organizar los controles, EMESRT permite clasificar escenarios de

interacción entre equipos móviles de acuerdo con su configuración operacional, diferenciando los encuentros según la relación entre las trayectorias y el movimiento de los equipos. Dantas et al. (2025) transforman esta clasificación en reglas aplicables a registros de sistemas de advertencia de colisiones, utilizando el modo de movimiento del equipo agente, el modo de movimiento del equipo oponente, el ángulo relativo de aproximación y la diferencia de rumbo entre ambos equipos para distinguir los distintos tipos de interacción vehicular.

2.4. Capacidades organizacionales y tecnológicas para el aprovechamiento de datos CAS

El aprovechamiento preventivo de los datos CAS requiere capacidades organizacionales y tecnológicas para sostener el uso del sistema, las cuales se clasifican en cuatro dimensiones: uso operacional del sistema, gestión de información y análisis, aprendizaje organizacional y mejora continua, e integración y madurez digital.

El uso operacional del sistema corresponde al grado en que el CAS se incorpora de manera sostenida en las prácticas habituales de la faena. Esto implica la comprensión de sus funciones por los usuarios, así como la utilización de la información generada en el apoyo a la supervisión y a las decisiones operacionales. Swanson et al. (2019) muestran que la confianza de los trabajadores en los sistemas automatizados de detección de proximidad se relaciona con su aceptación y uso, por lo que constituye un factor relevante para su incorporación efectiva en la operación.

La gestión de información corresponde a la capacidad de acceder a los antecedentes disponibles y organizados por el CAS, mientras que el análisis se entiende como la capacidad de revisar, discutir e interpretar los reportes por quienes participan en las decisiones operacionales y preventivas. Shimaponda-Nawa et al. (2023) vinculan la madurez de los sistemas de información en minería con la disponibilidad de información integrada, confiable y utilizable para la toma de decisiones.

El aprendizaje organizacional y la mejora continua corresponden a la capacidad de utilizar los resultados del análisis para revisar prácticas, ajustar controles, retroalimentar a los operadores, fortalecer la capacitación y supervisar las acciones implementadas. De acuerdo con el International Council on Mining and Metals [ICMM] (2015), una gestión madura de la seguridad requiere procesos estructurados de seguimiento, revisión y mejora continua que permitan fortalecer progresivamente los controles críticos.

La integración y madurez digital corresponden a la capacidad de articular bajo condiciones de disponibilidad tecnológica, soporte, mantenimiento, calidad de datos y gobernanza de la

información los datos CAS, tanto de plataforma utilizadas por la organización como con otras fuentes de información operacional. PwC (2019), Young y Rogers (2019) y GMG (2024) destacan la integración de sistemas y la interoperabilidad como componentes de la madurez digital en minería.

2.5. Información cuantitativa y variables operacionales para la caracterización de interacciones

La evaluación del riesgo operacional en minería se apoya habitualmente en matrices cualitativas, juicio experto, investigación de incidentes, auditorías y revisión de accidentes históricos. Estos enfoques cumplen un rol importante porque permiten estructurar decisiones, formalizar controles y priorizar acciones en condiciones de incertidumbre. La incorporación de información cuantitativa permite complementar estos enfoques al suplementar la comparación sistemática de los registros entre eventos, sectores y periodos operacionales.

Verster et al. (2023) proponen el uso de datos operacionales y herramientas digitales para apoyar una evaluación continua y cuantitativa del riesgo de interacción vehicular. El enfoque planteado integra información de posicionamiento, reglas del plan de tránsito y análisis de eventos para detectar no conformidades, identificar zonas de alta interacción y complementar métodos cualitativos basados en experiencia o historia operacional. Este antecedente respalda el uso de registros generados durante la operación como fuente de información para caracterizar las interacciones vehiculares.

La literatura de seguridad vial y modelación de severidad muestran que los atributos observables de un evento pueden aportar a la interpretación de sus consecuencias potenciales. Kononen et al. (2011) utilizaron variables disponibles en sistemas telemáticos, como cambio de velocidad, dirección de impacto, tipo de vehículo y características de los ocupantes para estimar la probabilidad de lesiones graves. Mientras que Sobhani et al. (2011) relacionaron la severidad de una colisión con variables físicas como energía cinética, masa, velocidad y tipo de impacto. Aunque estos estudios no pertenecen al contexto minero ni se replican directamente en este trabajo, permiten sustentar que la criticidad potencial de una interacción puede analizarse a partir de cuatro atributos observables del evento: la velocidad (I), la composición del par de equipos (II), geometría del encuentro (III) y la severidad temporal de la advertencia (IV).

La velocidad constituye una variable relevante debido a que afecta simultáneamente la energía asociada a una eventual colisión y al margen temporal disponible para reaccionar. A mayor velocidad, aumenta la energía cinética y disminuye el tiempo para ejecutar maniobras correctivas.

Rosén et al. (2011) muestran que el riesgo de fatalidad peatonal aumenta con la velocidad de impacto, aunque la magnitud estimada depende de la calidad de los datos utilizados.

La composición del par de equipos constituye un atributo relevante para interpretar la criticidad potencial de una interacción. Evans y Frick (1993) muestran que la diferencia de masa entre vehículos incide en el riesgo relativo de fatalidad y afecta con mayor severidad al ocupante del vehículo más liviano. En minería a cielo abierto, la diferencia entre masas de los equipos hace necesario caracterizar las interacciones según los equipos involucrados y su vulnerabilidad.

La geometría del encuentro permite incorporar al análisis la relación dinámica entre las trayectorias de los equipos. Ammoun y Nashashibi (2009) proponen estimar el riesgo de colisión mediante la modelación del entorno, la predicción de trayectorias, la detección de posibles colisiones y la evaluación de su peligrosidad.

La severidad temporal de la advertencia constituye otro atributo relevante cuando el sistema registra niveles asociados al tiempo disponible antes de una posible colisión. Un evento con menor margen temporal para reaccionar representa una condición operacional más exigente que una alerta con mayor anticipación.

3. Metodología

3.1. Diseño general de la metodología propuesta

Para desarrollar este trabajo, se propone una metodología construida a partir de los registros históricos del sistema CAS. Esta comprende la preparación y consolidación de los registros, la clasificación de los eventos, su contextualización espacial y el análisis integrado de los resultados. Cada etapa utiliza los eventos que disponen de la información requerida para su aplicación. A continuación, la Figura 4 sintetiza este proceso.

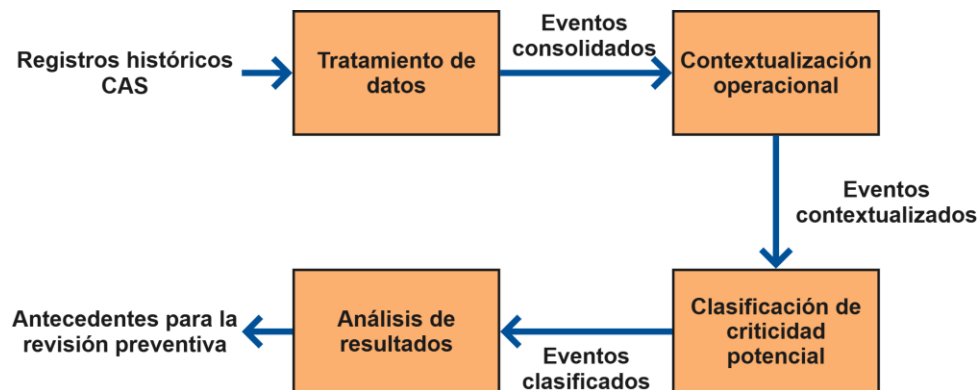


Figura 4: Diseño general de la metodología propuesta para transformar registros históricos CAS en indicadores de gestión operacional. Fuente: Elaboración propia.

El diseño se basa en tres principios: (I) trazabilidad: cada transformación debe poder explicarse a partir de los criterios aplicados y de la base resultante. (II) Replicabilidad: los criterios deben poder aplicarse de forma uniforme entre faenas, periodos o bases futuras. (III) Sensibilidad al contexto: aunque los criterios sean comunes, la interpretación debe reconocer diferencias de integridad de datos, continuidad temporal y configuración operacional.

3.2. Metodología de tratamiento de datos operacionales

La metodología de tratamiento de datos operacionales constituye la primera etapa del flujo y tiene como objetivo transformar el conjunto de registros históricos CAS en una base donde los registros asociados a una misma interacción entre equipos son representados mediante un único evento, aplicando previamente criterios de validación, estandarización y exclusión.

La Figura 5 presenta la secuencia utilizada para el tratamiento de los registros CAS, desde la identificación y validación de las variables requeridas hasta la consolidación de los registros y la construcción de los atributos necesarios para análisis posteriores.

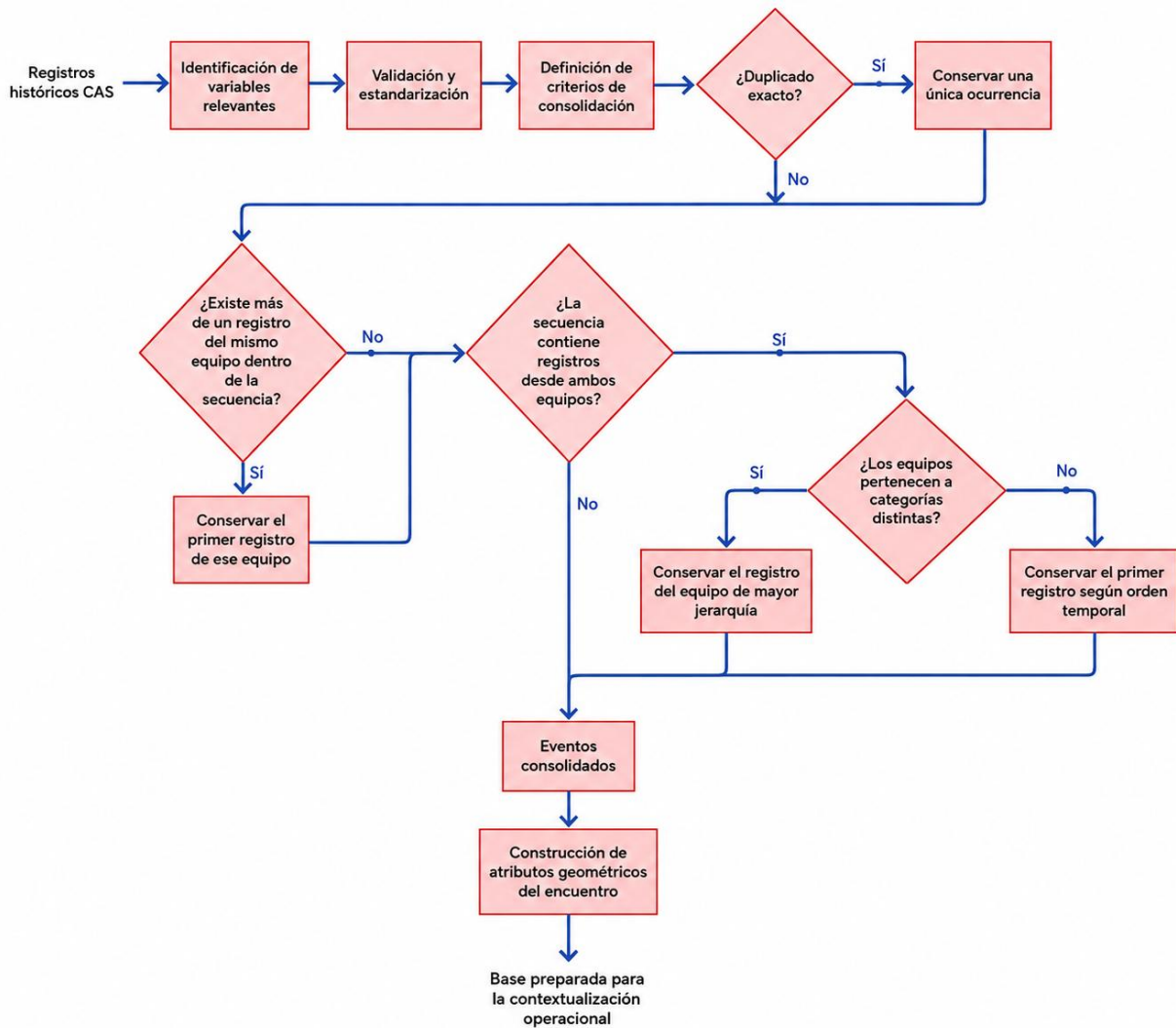


Figura 5: Metodología de tratamiento de datos operacionales CAS. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Identificación de variables relevantes

La primera actividad consiste en identificar las variables necesarias para aplicar las etapas posteriores de la metodología. No todas las variables contenidas en los registros CAS son utilizadas directamente; se seleccionan aquellas que permiten caracterizar cada interacción desde una perspectiva temporal, geométrica, espacial, operacional, cinemática y de margen temporal disponible antes de una posible colisión, expresado mediante el tiempo para la colisión (TTC, por su sigla en inglés *time to collision*). La Tabla 1 presenta las variables consideradas y su uso metodológico.

Tabla 1: Variables relevantes utilizadas en el tratamiento de registros CAS. Fuente: Elaboración propia.

Grupo de variables	Variables consideradas	Uso metodológico
Temporales	Fecha del evento, hora de inicio y hora de término de la alerta.	Ordenar los registros, identificar secuencias de alertas y aplicar la ventana temporal de consolidación.
Espaciales	Coordenadas geográficas del evento.	Validar la pertenencia espacial de los registros mediante polígonos de faena, construir la malla espacial y asignar cada evento a una celda.
Identificación operacional	Faena de origen, equipo que registra la alerta y equipo oponente involucrado.	Identificar la operación analizada, reconocer el par de equipos involucrados y consolidar registros asociados a una misma interacción.
Tipo de equipo	Tipo de equipo que registra la alerta y tipo de equipo oponente.	Asignar cada equipo a una categoría operacional y determinar posteriormente la composición del par involucrado.
Movimiento y velocidad	Velocidad del equipo que registra la alerta, velocidad del equipo oponente, modo de movimiento del equipo que registra la alerta y modo de movimiento del equipo oponente.	Aplicar la clasificación geométrica según los modos de movimiento, calcular la velocidad utilizada en contextualización espacial y clasificación individual.
Geometría relativa de la interacción	Ángulo relativo de aproximación y diferencia de rumbo entre equipos.	Clasificar la configuración geométrica de la interacción según la taxonomía EMESRT.
Categoría TTC	Categoría temporal de la interacción expresada como TTC. Alta para valores menores a 3 segundos, Media para valores entre 3 y 5 segundos y Baja para valores superiores a 5 segundos.	Incorporar la urgencia temporal de la alerta dentro de la clasificación de criticidad potencial.

3.2.2 Validación y estandarización inicial

Una vez identificadas las variables utilizadas, los archivos disponibles se integran en una base común por cada faena, organizando los registros bajo una estructura consistente.

Los controles aplicados durante esta etapa buscan asegurar que la información utilizada en el tratamiento posterior mantenga una estructura consistente y disponga de los antecedentes mínimos requeridos. La Tabla 2 presenta los criterios de validación y estandarización considerados y su efecto en el procesamiento de los registros.

Tabla 2: Criterios de validación y estandarización inicial de los registros CAS. Fuente: Elaboración propia.

Control aplicado	Criterio utilizado	Efecto en el procesamiento
------------------	--------------------	----------------------------

Estandarización de formato	Conversión de fechas, horas y variables numéricas a formatos consistentes.	Permite trabajar registros provenientes de distintas faenas bajo una estructura común.
Identificación de los equipos involucrados	Registros con identificador disponible del equipo que registra la alerta y del equipo oponente involucrado.	Conserva únicamente los registros que representan una interacción entre dos equipos reconocibles
Validación espacial	Registros con coordenadas geográficas válidas y ubicados dentro del polígono operacional de la faena.	Define el subconjunto de registros utilizable en los análisis que requieren ubicación espacial.
Verificación temporal	Registros con hora de inicio y hora de término disponibles, comprendidos dentro de la ventana de análisis definida en la consulta a la base de datos.	Verifica la consistencia temporal de los registros extraídos y permite ordenarlos para reconocer secuencias asociadas al mismo par operacional.

3.2.3 Definición de criterios de consolidación y jerarquía operacional

Antes de aplicar la consolidación temporal, se definen los criterios utilizados para comparar los registros de manera consistente. Estos criterios consideran: (I) el par de equipos involucrados - independiente del sentido en que la interacción haya quedado registrada-, (II) una ventana temporal de cinco segundos, y (III) la jerarquía operacional de los tipos de equipo. Su aplicación permite distinguir entre registros consecutivos asociados a una misma interacción y aquellos generados desde ambas unidades CAS involucradas.

La jerarquía operacional se utiliza como criterio de apoyo para seleccionar el registro representativo cuando una misma interacción queda registrada desde ambos equipos. La Tabla 3 presenta las categorías consideradas y los tipos operacionales asociados a cada una.

Tabla 3: Jerarquía operacional de tipos de equipo utilizada en la consolidación de registros recíprocos. Fuente: Elaboración propia.

Jerarquía operacional	Criterio de asignación	Tipos operacionales incluidos
A	Equipos de menor masa o porte relativo dentro del conjunto vehicular considerado.	LightVehicle
B	Equipos auxiliares, de apoyo, mantención o servicio, de porte intermedio dentro de la operación.	BackhoeExcavator, BackhoeLoader, SmallExcavator, SmallWheelLoader, ServiceTruck, Grader, Excavator, MobileCrane y TyreHandler

C	Equipos de mayor masa o porte operacional, asociados principalmente a transporte, carguío, empuje, perforación, riego o apoyo productivo de gran escala.	StockpileDozer, Drill, FrontShovel, LargeWheelLoader, TrackDozer, WheelDozer, WaterTruck, WaterTanker, HaulTruck y Dozer
Fuera de jerarquía	Infraestructura u objetos registrados por el sistema que no corresponden a equipos móviles incluidos en las categorías anteriores.	Beacon, BoomGate y TrainFront

En esta metodología, se denomina agente metodológico al equipo desde cuya unidad CAS se genera o mantiene el registro conservado como representativo de la interacción. El equipo oponente corresponde al otro equipo involucrado en la interacción. Cuando una misma interacción queda registrada desde ambas unidades CAS, las reglas de consolidación determinan cuál de los registros se conserva como representante. Estas denominaciones se utilizan únicamente para organizar los registros, y no asignan culpa, causalidad ni responsabilidad operacional a ninguno de los involucrados.

3.2.4 Control de duplicado y consolidación temporal de registros

Durante la revisión inicial de las bases se identificaron tres condiciones que podían generar sobre contabilización de interacciones: duplicados exactos, registros consecutivos asociados al mismo par operacional y registros generados desde ambos equipos dentro de una misma ventana. Si cada registro se contabilizara de manera independiente, el análisis podría sobre estimar la cantidad de interacciones observadas. Para controlar estas condiciones, la metodología aplica una secuencia de criterios orientados a conservar un único registro representativo cuando corresponde:

1. Control de duplicados exactos: Cuando dos o más registros presentan la misma información en la base procesada, se conserva una única ocurrencia.
2. Consolidación de alertas consecutivas del mismo par operacional: Los registros consecutivos asociados al mismo par de equipos se agrupan cuando la diferencia entre sus horas de inicio es menor o igual a cinco segundos. El agrupamiento se realiza de manera encadenada, de modo que un registro se incorpora a la misma secuencia cuando

comienza dentro de esta ventana respecto del registro inmediatamente anterior. Entre registros generados desde el mismo equipo dentro de una secuencia se conserva el primero.

3. Consolidación de registro generados desde ambos equipos: Se consideran registros recíprocos aquellos asociados a una misma interacción que son generados desde ambas unidades CAS involucradas. Cuando esta condición se presenta dentro de una misma secuencia temporal, se aplica la jerarquía operacional para seleccionar un único registro representativo. Si los equipos pertenecen a categorías distintas, se conserva como agente metodológico el registro asociado al equipo de mayor jerarquía. Si ambos equipos pertenecen a la misma categoría, se conserva el primer registro según el orden temporal.

3.2.5 Construcción de atributos geométricos del encuentro

Una vez aplicados los controles de duplicidad y la consolidación temporal, los eventos consolidados se caracterizan según la geometría del encuentro. Para ello, se utilizan el modo de movimiento del agente metodológico, el modo de movimiento del equipo oponente, el ángulo relativo de aproximación y la diferencia de rumbo entre ambos equipos.

Este atributo permite traducir la información cinemática contenida en los registros CAS en una categoría de interacción interpretable. La clasificación se basa en las configuraciones de encuentro de EMESRT operacionalizadas por Dantas et al. (2025) y adaptadas a las variables disponibles en la base analizada. La Tabla 4 presenta los criterios aplicados para asignar cada evento consolidado a una clase geométrica de interacción y el detalle de cada clase se presenta en el Anexo 9.7.

Tabla 4: Reglas de clasificación geométrica de interacciones vehiculares según EMESRT. Fuente: Adaptado de Dantas et al. (2025).

Clasificación EMESRT	Modo de movimiento agente	Modo de movimiento oponente	Relative bearing	Heading difference
L1 - Head-on	Avance	Avance, Detenido, Detenido con rumbo desconocido	-20 a 20	>150 o <-150
L3 - Reverse-on	Retroceso	Retroceso	160 a 180 o -180 a -160	>150 o <-150
L2 - Backup	Retroceso	Cualquiera	160 a 180 o -180 a -160	Cualquiera
L4 - Dovetailing	Avance	Avance	-20 a 20	>-30 y <30
L5 - Passing Head-on	Avance	Avance	>20 y <160 o >-160 y <-20	>150 o <-150

L6 - Passing Reverse-on	Avance	Retroceso, Detenido, Detenido con rumbo desconocido	>20 y <160 o >-160 y <-20	>-30 y <30
L7 - Overtaking	Avance	Avance	>20 y <160 o >-160 y <-20	>-30 y <30
C1 - Curving Head-on	Avance	Avance	>20 y <160 o >-160 y <-20	120 a 150 o -150 a -120
C2 - Curving Dovetail	Avance	Avance	>20 y <120 o >-120 y <-20	30 a <60 o >-60 a -30
C3 - Curving Reverse-on	Retroceso	Retroceso, Detenido, Detenido con rumbo desconocido	>20 y <160 o >-160 y <-20	30 a <60 o >-60 a -30
T1 - Merge	Avance	Avance	120 a 180 o -180 a -120	30 a <60 o >-60 a -30
T2 - Crossover	Avance	Avance	-20 a 20	120 a 150, -150 a -120, 30 a <60 o >-60 a -30
T3 - Junction	Avance	Avance	60 a 120 o -120 a -60	60 a <120 o >-120 a -60
T4 - Intersection	Avance	Avance	-20 a 20	60 a <120 o >-120 a -60

3.3. Metodología de contextualización operacional de eventos CAS

Luego del tratamiento de los registros operacionales, la metodología incorpora una etapa orientada a contextualizar de forma espacial y operacional los eventos CAS. Para ello, los eventos se organizan mediante una malla espacial regular, lo que permite caracterizar cada celda según concentración de eventos y condición de velocidad. A partir de esta caracterización se construyen los Contextos Analíticos de Interacción (CAI), utilizados para incorporar a cada evento información sobre el contexto espacial en que se encuentra registrado.

En esta memoria, los CAI se proponen como categorías analíticas construidas para el estudio y su definición se apoya en una lógica de análisis espacial de eventos georreferenciados, donde registros puntuales se agrupan en unidades espaciales para observar patrones de concentración. Esta lógica se adapta al análisis de registros CAS mediante dos criterios: concentración relativa de eventos por celda y velocidad media de los eventos asignados a cada celda. La combinación de ambos criterios permite diferenciar las condiciones espaciales bajo las cuales se distribuyen las interacciones registradas. Su uso es consistente con aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG, también conocidos como GIS en sus siglas en inglés) que emplean grillas o unidades espaciales para agrupar eventos y examinar su distribución (Afolayan et al., 2022).

En el contexto minero, esta aproximación se relaciona con enfoques que utilizan datos vehiculares para identificar áreas de interacción y apoyar la gestión preventiva del riesgo entre equipos móviles (Verster et al., 2023). A partir de ello, los CAI se plantean como una adaptación metodológica propia de este estudio, orientada a diferenciar las celdas según la combinación entre concentración espacial de eventos y velocidad media. La Figura 6 presenta la secuencia aplicada en esta etapa.

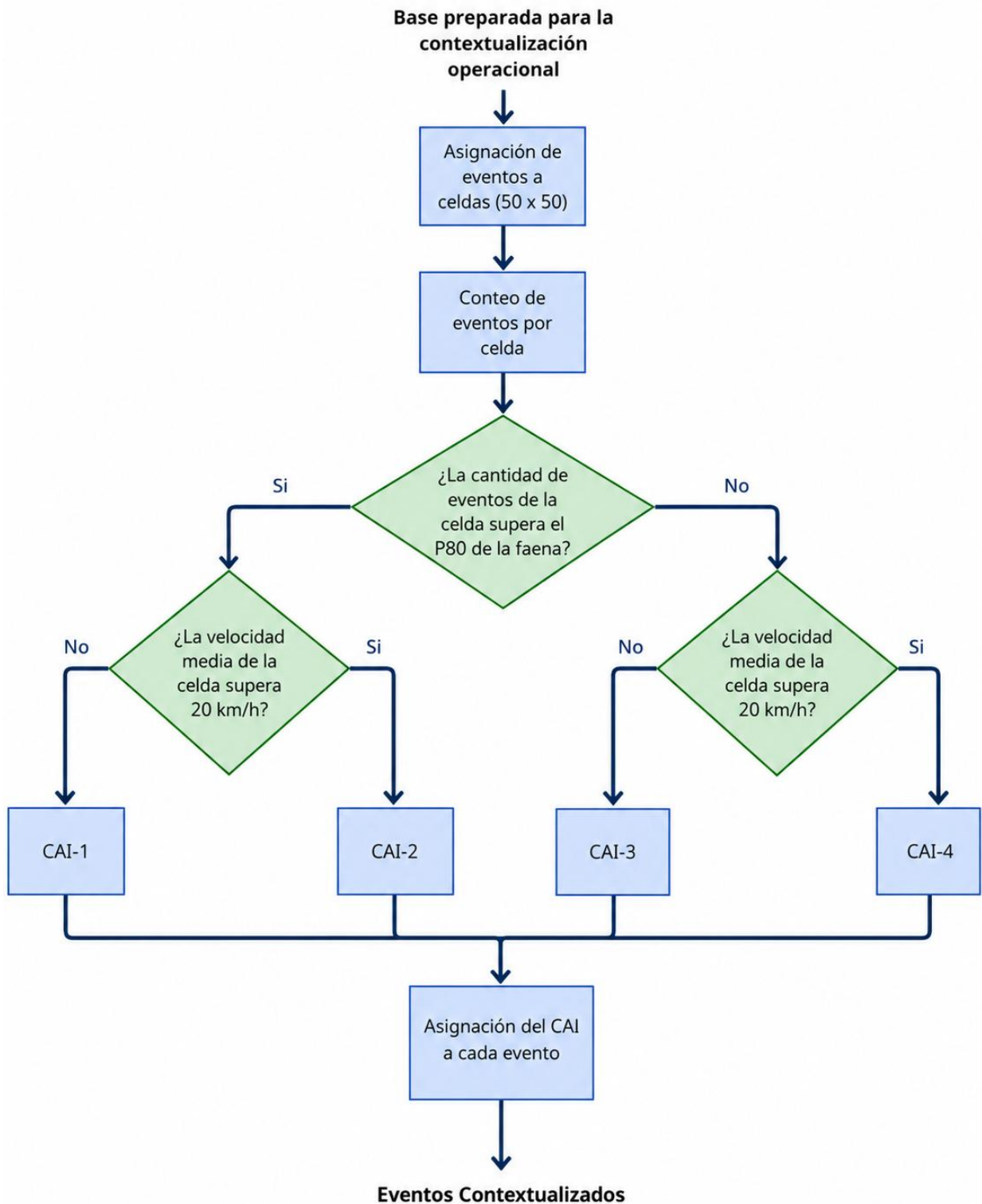


Figura 6: Metodología de contextualización operacional de eventos CAS. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Construcción de malla espacial

La malla espacial divide el entorno operacional en celdas regulares de 50 metros por 50 metros. Cada evento CAS se asigna a una celda en función de sus coordenadas. Para ello, se toma la

posición del evento y se determina el intervalo de 50 metros en que se ubica en los ejes X e Y, considerando como referencia el origen espacial definido para la malla de cada faena. Esta asignación transforma registros puntuales en unidades espaciales comparables para el análisis de concentración y velocidad.

El tamaño de celda de 50 metros se adopta como un criterio metodológico de agregación espacial, cuya función es establecer una escala de agrupación espacial para observar patrones de concentración de eventos, sin intentar representar el área exacta de una maniobra individual ni reproducir la geometría específica de cada camino, intersección o zona operacional.

El valor de 50 metros es seleccionado en función de buscar un equilibrio práctico entre dos efectos opuestos. Una celda demasiado pequeña podría fragmentar eventos que pertenecen a un mismo sector funcional de interacción, especialmente considerando la escala de equipos móviles, los anchos de vía, los radios de giro, las zonas de cruce y la incertidumbre propia del posicionamiento registrado. En cambio, una celda demasiado grande podría fusionar áreas operacionalmente distintas, reduciendo la capacidad de distinguir sectores específicos de concentración. En aplicaciones posteriores, este valor puede recalibrarse si se dispone de información más detallada sobre geometría de caminos, precisión efectiva del posicionamiento o características específicas de la flota.

3.3.2 Caracterización de concentración de eventos por celda

Una vez asignados los eventos a la malla espacial, se calcula la cantidad de eventos registrados en cada celda. A partir de este conteo, se utiliza el percentil 80 de eventos por celda -calculado de manera independiente para cada faena- para identificar las celdas con mayor concentración. Este criterio establece un umbral relativo de concentración sin depender de un umbral absoluto de eventos, lo que resulta relevante ante diferencias entre operaciones en volumen y distribución de los registros disponibles.

Una celda se clasifica como concentración alta cuando su cantidad de eventos supera estrictamente el percentil 80, calculado para la faena correspondiente; las celdas restantes se consideran de concentración baja. Esta regla permite que la condición dependa de la distribución interna de cada operación, con un criterio comparable y replicable entre faenas. En aplicaciones posteriores, el umbral puede ajustarse según las características específicas de la operación si se requiere evaluar una delimitación más amplia o restrictiva.

3.3.3 Caracterización de velocidad operacional por celda

Además de la concentración espacial, se calcula la velocidad media de los eventos asignados a cada celda, utilizando el valor absoluto de la velocidad del agente metodológico. Esta variable

permite diferenciar las celdas según condiciones de menor o mayor velocidad media. Esta caracterización se utiliza posteriormente junto con la concentración de eventos para distinguir los distintos contextos espaciales de interacción definidos mediante los CAI.

Para clasificar esta condición se adopta un umbral de 20 km/h. Las celdas con una velocidad media menor o igual al umbral se distinguen de aquellas cuya velocidad media lo supera. Esta separación permite establecer dos condiciones que posteriormente se combinan con la concentración de eventos para construir los distintos CAI. La selección del umbral busca evitar que una de estas condiciones quede restringida únicamente a velocidades muy bajas. En aplicaciones posteriores, el umbral puede ajustarse según las condiciones de circulación, límites internos de velocidad, diseño de caminos o configuración operacional de cada faena.

3.3.4 Delimitación del Contexto Analítico de Interacción

Una vez caracterizadas las celdas según concentración de eventos y velocidad media, ambas condiciones se combinan para construir los CAI. Estos contextos permiten diferenciar las celdas según la concentración espacial de los eventos y la condición de velocidad definida previamente. La Tabla 5 presenta las cuatro combinaciones utilizadas para su asignación.

Tabla 5: Contextos Analíticos de Interacción definidos a partir de la concentración de eventos y velocidad media por celda. Fuente: Elaboración propia.

Contexto	Concentración de eventos	Velocidad media por celda
CAI-1	Alta	≤ 20 km/h
CAI-2	Alta	> 20 km/h
CAI-3	Baja	≤ 20 km/h
CAI-4	Baja	> 20 km/h

Cada uno de estos contextos aporta una lectura espacial distinta de las interacciones registradas, donde el CAI-1 orienta la revisión de sectores en que los encuentros entre equipos forman parte recurrente de la dinámica operacional, por lo que puede contribuir a reconocer puntos cuya configuración o función favorece interacciones repetidas. El CAI-2 permite focalizar sectores donde esa recurrencia se presenta bajo condiciones de desplazamiento más exigentes, haciendo relevante revisar cómo se desarrolla la circulación en esos puntos. Por su parte, el CAI-3 permite mantener visibles interacciones menos recurrentes asociadas a condiciones de desplazamiento más acotadas, mientras que el CAI-4 permite reconocer interacciones menos frecuentes que

ocurren bajo condiciones de mayor velocidad y que podrían perder relevancia en un análisis centrado únicamente en la concentración espacial.

La clasificación CAI se incorpora posteriormente a cada evento de acuerdo con la celda espacial a la que pertenece, quedando las celdas y sus contextos como base espacial de los análisis posteriores. La denominación CAI-1 a CAI-4 se utiliza únicamente para identificar los distintos contextos y no establece un orden de criticidad o prioridad entre ellos.

3.4. Metodología de clasificación de eventos CAS

La clasificación de criticidad potencial considera cuatro criterios asociados a las características de cada interacción: criticidad geométrica, composición del par de equipos, velocidad de referencia y categoría temporal TTC. Estos criterios se evalúan de manera independiente y posteriormente se combinan para asignar a cada evento un nivel de criticidad potencial. Las condiciones específicas utilizadas en cada criterio y las reglas de asignación de Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 se desarrollan en las subsecciones siguientes.

La Figura 7 resume la secuencia de evaluación aplicada para asignar el nivel de criticidad potencial a los eventos que cuentan con la información mínima requerida.

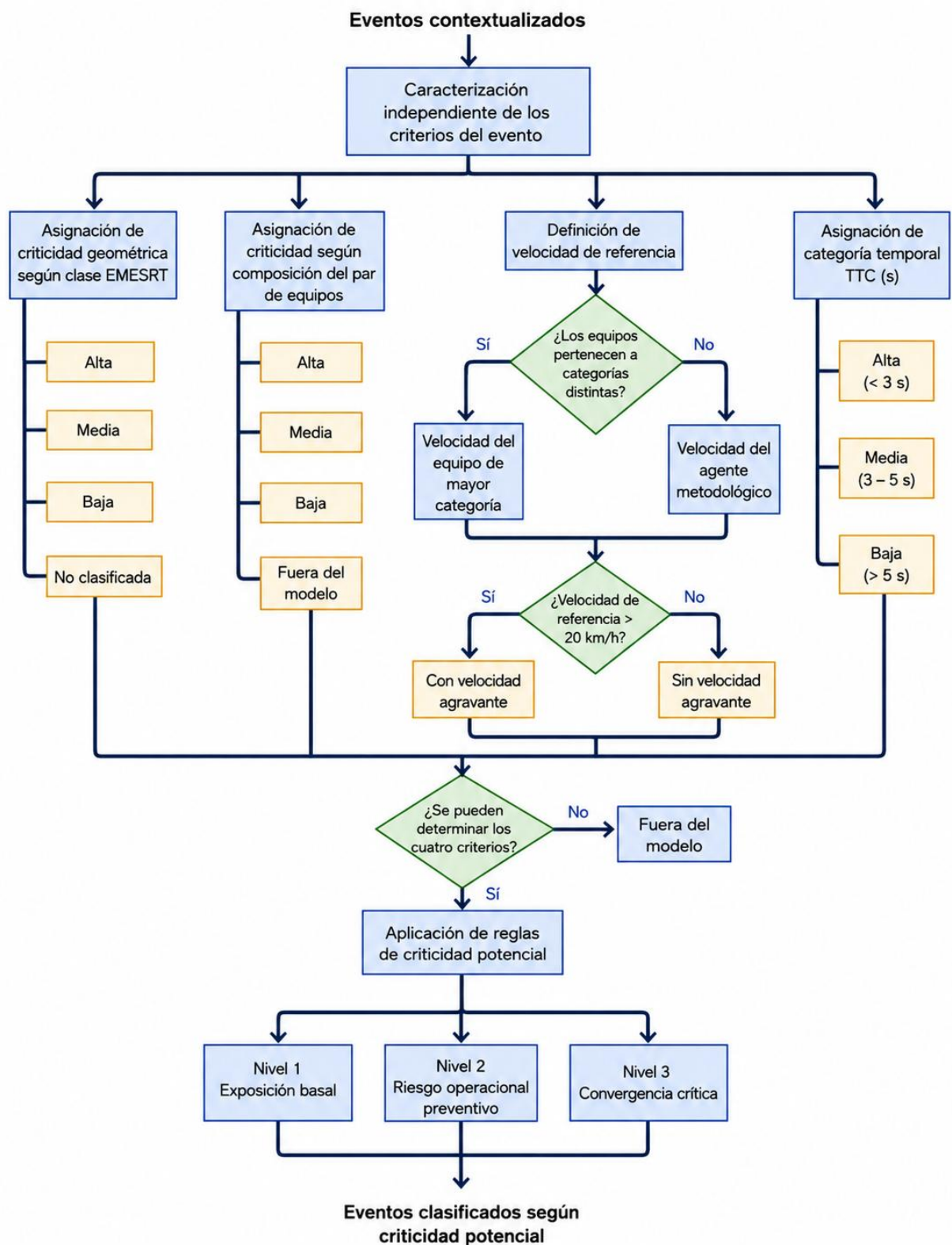


Figura 7: Metodología de clasificación de eventos CAS según criticidad potencial. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1 Criticidad geométrica de la interacción

El primer criterio de clasificación corresponde a la criticidad geométrica de la interacción, donde se utiliza la clase geométrica construida previamente mediante la clasificación EMESRT descrita en la Sección 3.2.5. A partir de estas clases, se establece una jerarquía de criticidad relativa orientada a diferenciar las configuraciones de encuentro según la relación de convergencia entre las trayectorias proyectadas de los equipos. La Tabla 6 presenta la regla utilizada para convertir cada clase de interacción en un nivel de criticidad geométrica.

Tabla 6: Criticidad geométrica asociada a las clases de interacción. Fuente: Elaboración propia

Criticidad geométrica	Clases asociadas	Criterio de asignación
Alta	L1 Head-on, L2 Backup, L3 Reverse-on, C1 Curving Head-on, T2 Crossover, T4 Intersection	Las trayectorias proyectadas presentan una oposición o intersección directa, orientando los desplazamientos hacia un mismo espacio de circulación.
Media	L5 Passing Head-on, L6 Passing Reverse-on, C3 Curving Reverse-on, T3 Junction	Las trayectorias proyectadas presentan una relación lateral u oblicua de conflicto, con oposición o convergencia entre los desplazamientos.
Baja	L4 Dovetailing, L7 Overtaking, C2 Curving Dovetail, T1 Merge	Las trayectorias proyectadas presentan una orientación predominantemente coincidente o convergente, manteniendo una mayor compatibilidad entre los desplazamientos.
No clasificada	Sin clase geométrica válida	Evento sin información suficiente para clasificar.

Cuando el evento no dispone de una clase EMESRT válida, la condición que impide esta asignación se conserva de manera trazable según el resultado obtenido durante la clasificación geométrica.

3.4.2 Criticidad según composición del par de equipos

El segundo criterio corresponde a la criticidad asociada a la composición del par de equipos involucrados. Para ello, se utilizan las categorías operacionales A, B y C definidas previamente, las cuales diferencian los equipos según su masa, porte y vulnerabilidad relativa. La asignación considera tanto la diferencia entre las categorías involucradas como las características relativas de los equipos que conforman cada combinación. La Tabla 7 presenta la matriz utilizada para asignar la criticidad del par.

Tabla 7: Matriz de criticidad base según composición del par de equipos. Fuente: Elaboración propia.

Combinación del par	Criticidad base	Interpretación operacional
A - A	Baja	Ambos equipos son livianos y de porte comparable, por lo que no existe una asimetría operacional relevante entre los involucrados.
A - B	Media	La interacción entre un equipo liviano y uno intermedio introduce una diferencia de porte y vulnerabilidad relativa mayor que en las combinaciones homogéneas de menor categoría.
A - C	Alta	Combina un equipo liviano con uno de mayor masa y porte operacional, configurando la mayor asimetría relativa contemplada en la matriz.

B - B	Baja	Los equipos presentan características de porte comparables y no existe una asimetría marcada entre las categorías involucradas.
B - C	Media	Interacción entre equipo intermedio y equipo pesado de operación, con diferencia relevante de porte, función y energía operacional esperada.
C - C	Media	Interacción entre equipos pesados, con alta energía operacional esperada.

Cuando alguno de los involucrados corresponde a infraestructura o a un tipo no reconocido dentro de las categorías A, B o C, no se asigna criticidad del par, debido a que la combinación no forma parte de la matriz vehicular definida.

3.4.3 Velocidad de referencia y condición de velocidad

El tercer criterio incorpora la velocidad como condición cinemática del evento, que a diferencia de la contextualización espacial desarrollada en la Sección 3.3.3, donde se utiliza como promedio por celda para caracterizar el contexto operacional, en esta etapa se evalúa a nivel individual como uno de los criterios considerados en la clasificación de criticidad potencial.

Para ello, se define una velocidad de referencia única a partir de las velocidades de los dos equipos involucrados. Cuando estos pertenecen a categorías operacionales diferentes, se utiliza el valor absoluto de la velocidad del equipo de mayor categoría; cuando pertenecen a la misma categoría, se utiliza el valor absoluto de la velocidad del agente metodológico definido durante la consolidación. Esta selección permite mantener un único criterio de referencia para cada interacción y, en los pares de distinta categoría, asociarlo al equipo de mayor porte operacional.

Una vez definida la velocidad de referencia, se adopta un umbral de 20 km/h, correspondiente al mismo valor utilizado en la caracterización de velocidad por celda, para diferenciar la condición de velocidad del evento. Los valores superiores a este umbral se consideran con velocidad agravante, mientras que los valores iguales o inferiores se consideran sin velocidad agravante. Esta separación permite incorporar de forma explícita la magnitud del desplazamiento dentro de la clasificación individual y, al mantener la misma referencia del contexto espacial, contrastar la condición del evento con la del sector en que ocurre.

3.4.4 Categoría temporal Time to Collision

El cuarto criterio corresponde a la categoría temporal Time To Collision (TTC) asociada a la interacción detectada, la cual representa el margen temporal disponible ante el encuentro entre los equipos y permite diferenciar los eventos según la urgencia temporal con que se desarrolla la interacción. A menor TTC, menor es el margen disponible para responder, mientras que valores mayores representan una mayor anticipación temporal.

A partir del valor TTC asociado a cada evento, se asigna una categoría temporal según los siguientes rangos:

- TTC Alta: Valores menores a 3 segundos
- TTC Media: Valores entre 3 y 5 segundos
- TTC Baja: Valores superiores a 5 segundos.

3.4.5 Asignación del nivel de criticidad potencial

La asignación final del nivel de criticidad potencial integra los criterios definidos en las subsecciones anteriores: criticidad geométrica, criticidad del par de equipos, condición de velocidad y categoría temporal TTC. La clasificación individual se aplica únicamente a los eventos para los cuales estos criterios pueden determinarse válidamente; los eventos restantes se mantienen fuera del modelo individual.

A partir de la combinación de estos criterios se definen tres niveles de criticidad potencial. La Tabla 8 sintetiza el significado asignado a cada nivel dentro de la metodología.

Tabla 8: Niveles de criticidad potencial de eventos CAS. Fuente: Elaboración propia.

Nivel	Denominación	Interpretación metodológica
Nivel 1	Exposición Basal	Interacción en la que las condiciones observadas no convergen en una configuración suficiente para establecer una atención preventiva mayor.
Nivel 2	Riesgo Operacional Preventivo	Interacción en la que la combinación de las condiciones temporal, cinemática, geométrica y de composición del par alcanza una relevancia suficiente para justificar una revisión preventiva diferenciada.
Nivel 3	Convergencia Crítica	Interacción en la que convergen las condiciones más exigentes definidas para las dimensiones temporal, cinemática, geométrica y de composición del par.

Para construir los niveles se adoptan como puntos de separación aquellas categorías que representan un cambio relevante dentro de cada criterio. En primer lugar, para la criticidad geométrica, el corte se establece desde la categoría Media, correspondiente a configuraciones en que las trayectorias proyectadas presentan oposición o una relación lateral u oblicua de conflicto.

Para la criticidad del par de equipos, el corte se establece desde la categoría Media, debido a que incorpora combinaciones con diferencias entre categorías de equipos o la participación de equipos de mayor porte operacional. En el criterio temporal, el corte se establece desde TTC Media, ya que esta categoría marca el paso desde una condición de mayor anticipación hacia una interacción desarrollada dentro de un margen temporal acotado.

En relación con la velocidad, la presencia de la condición cinemática agravante refuerza la exigencia de la interacción, mientras que cuando esta no se presenta, la clasificación se restringe a una combinación más exigente, considerando que una diferencia marcada de porte entre los equipos permite mantener como relevantes configuraciones de encuentro que no necesariamente corresponden a la condición geométrica más severa, siempre que además exista una mayor exigencia temporal.

Las condiciones utilizadas para la asignación de cada nivel son las siguientes:

1. Nivel 1 – Exposición Basal

- Evento cuya combinación de criterios se encuentra fuera de los umbrales definidos.

2. Nivel 2 – Riesgo Operacional Preventivo

El Nivel 2 puede asignarse mediante dos configuraciones de criterios:

- Con velocidad de referencia superior a 20 km/h:
 - TTC Media o Alta.
 - Criticidad geométrica Media o Alta.
 - Criticidad del par Media o Alta.
- Con velocidad de referencia igual o inferior a 20 km/h:
 - TTC Alta.
 - Criticidad geométrica Media o Alta.
 - Criticidad Alta del par.

La convergencia simultánea de la condición máxima en todos los criterios queda excluida de esta categoría.

3. Nivel 3 – Convergencia Crítica

- TTC Alta.
- Velocidad de referencia superior a 20 km/h.
- Criticidad geométrica Alta.
- Criticidad Alta del par.

3.5. Metodología de análisis integrado de resultados

El análisis de resultados corresponde a la etapa final de la metodología propuesta y tiene como propósito utilizar las salidas obtenidas en las etapas anteriores para reconocer patrones relevantes en los registros CAS y generar antecedentes que apoyen la priorización de interacciones y la orientación de su revisión preventiva. La Figura 8 sintetiza la secuencia metodológica del análisis de resultados.

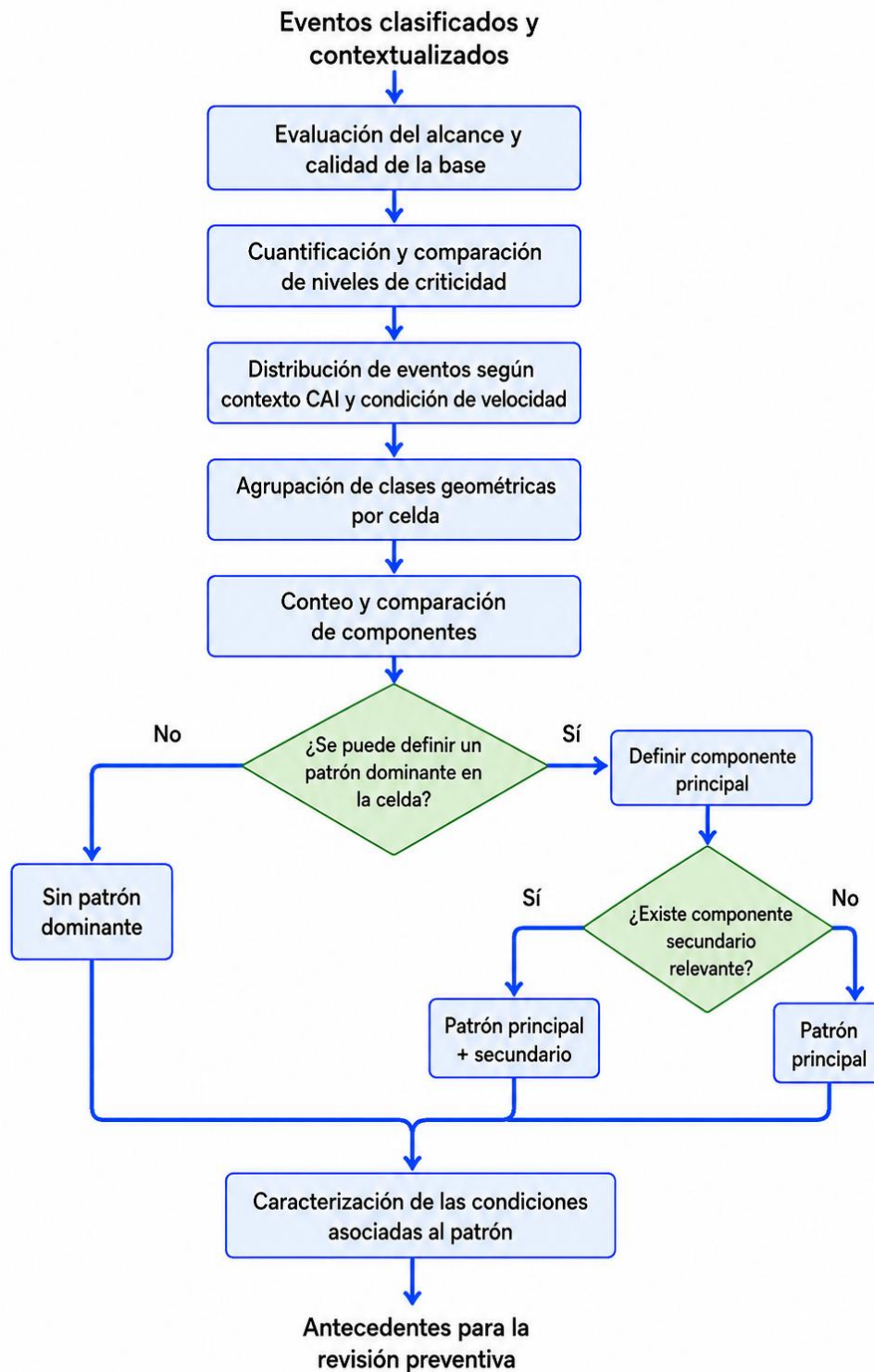


Figura 8: Metodología de análisis integrado de resultados. Fuente: Elaboración propia.

3.5.1 Caracterización de la base analítica efectiva

La primera etapa del análisis integrado corresponde a la caracterización de la información disponible durante la ventana de estudio definida para cada aplicación. Esta caracterización

considera la continuidad temporal de los registros y la completitud de los antecedentes requeridos por la metodología, estableciendo el alcance de la base utilizada en los análisis posteriores. Estas condiciones se incorporan como antecedentes para la interpretación de los patrones obtenidos. La Tabla 9 presenta los criterios utilizados para caracterizar la base analítica efectiva.

Tabla 9: Criterios para la caracterización de la base analítica efectiva. Fuente: Elaboración propia.

Aspecto analizado	Criterio metodológico
Continuidad temporal	Caracterización mediante el conteo diario de registros CAS a lo largo de la ventana nominal de análisis.
Días sin registros	Identificación de los días con conteo diario igual a cero.
Actividad registrada atípicamente baja	Para los días con registros se calcula ($IQR = Q_3 - Q_1$) y se identifica como atípicamente bajo un conteo diario inferior a ($Q_1 - 1,5IQR$).
Cobertura de información	Proporción de registros con información disponible para las variables requeridas por la metodología respecto de la base correspondiente a la ventana nominal de análisis.
Elegibilidad para clasificación	Cantidad y proporción de eventos que dispone de los antecedentes requeridos para aplicar la clasificación de criticidad potencial.
Eventos fuera del modelo	Cantidad y proporción de eventos que no alcanza la clasificación, junto con las principales causas asociadas.

3.5.2 Análisis de criticidad potencial y contextos de interacción

Una vez caracterizada la base analítica efectiva, el análisis se concentra en los eventos de Nivel 2 y Nivel 3 por corresponder a las categorías de mayor interés preventivo, mientras que el Nivel 1 se mantiene como referencia para interpretar su importancia dentro del conjunto de eventos elegibles. La Tabla 10 presenta los criterios utilizados para desarrollar este análisis.

Tabla 10: Criterios para el análisis de criticidad potencial y Contextos Analíticos de Interacción. Fuente: Elaboración propia.

Aspecto analizado	Criterio metodológico
Distribución de criticidad potencial	Se calcula la cantidad y participación relativa de Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 respecto del total de eventos elegibles.
Distribución por CAI	Para los eventos de Nivel 2 y Nivel 3 se determina su participación relativa en cada uno de los cuatro Contextos Analíticos de Interacción, por faena.
Condición de velocidad por contexto	Para los eventos de Nivel 2 se determina la participación de la condición de velocidad agravante dentro de cada contexto CAI.

3.5.3 Identificación de patrones de interacción por celda

La última etapa del análisis busca caracterizar cada celda a partir de las clases geométricas asociadas a los eventos de Nivel 2 y Nivel 3 registrados en ella, construyendo un patrón que sintetice el tipo de encuentro presente en la ubicación. Para ello, las clases geométricas se agrupan cuando, pese a representar configuraciones específicas distintas, mantienen una misma relación operacional entre los movimientos de los equipos. De este modo, se definen los siguientes componentes:

- Longitudinal en avance (LA) = L1+L5.
- Componente de reversa (REV) = L2+L3+L6+C3.
- Encuentros en curva y cruce (EC) = C1+T2+T3+T4.

En cada celda, el componente que registra la mayor cantidad de eventos se define como principal y se utiliza como referencia para evaluar los componentes restantes. El patrón se construye a partir de la combinación de componentes que caracteriza el tipo de interacción de la celda, sin que ello implique la ausencia de otras configuraciones registradas. Una componente secundaria se considera relevante cuando se cumple:

$$N_{secundaria} \geq 0,5N_{principal}$$

A partir de este criterio, el patrón queda definido por la componente principal y, cuando corresponda, por una secundaria relevante. En el caso de que exista una igualdad entre componentes, la celda se clasifica como sin patrón dominante.

Con esta caracterización, los antecedentes específicos disponibles para cada celda permiten examinar la interacción según las condiciones observadas en la ubicación y orientar los aspectos que requieren atención preventiva.

4. Caso de estudio

La aplicación en faenas reales permite ejecutar la metodología propuesta de manera completa y observar el tipo de resultados que entrega en distintos contextos operacionales. Su propósito es mostrar cómo operan los criterios definidos sobre bases reales, reconociendo que las condiciones de cada faena determinan el alcance efectivo del análisis.

Dado que el estudio se desarrolla sobre el sistema Collision Avoidance System de Hexagon, la aplicación se realiza en cuatro faenas mineras a cielo abierto ubicadas en Chile que cuentan con el sistema HxGN MineProtect CAS 10 implementado en la totalidad de su flota y que aceptaron participar en el desarrollo del estudio. Las operaciones se identifican en esta memoria como Faena 1, Faena 2, Faena 3 y Faena 4, esto con el fin de resguardar el anonimato de las operaciones analizadas.

Los registros históricos analizados fueron proporcionados por Hexagon y constituyen la base operacional del estudio y corresponden al periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre del 2025.

En cada faena se caracterizó el contexto organizacional en que se aplica la metodología, a partir de información declarada por participantes con conocimiento directo del uso o gestión del sistema CAS. En total, participaron 14 informantes distribuidos en cuatro para la Faena 1, cuatro para la Faena 2, tres para la Faena 3 y tres para la Faena 4.

Esta información se levantó mediante un cuestionario cerrado, aplicado de manera individual y anónima, cuyas preguntas se agrupan en las cuatro dimensiones definidas en la Sección 2.4 y donde cada dimensión se resume en tres niveles de desarrollo: bajo, medio y alto. El instrumento y sus criterios de codificación se presentan en el Anexo 9.4.

La Tabla 11 presenta el nivel alcanzado por cada faena en las dimensiones evaluadas.

Tabla 11: Perfil de gestión declarada del sistema CAS por faena. Fuente: Elaboración propia.

Faena	Uso operacional	Gestión de información y análisis	Aprendizaje organizacional y mejora continua	Integración y madurez digital
Faena 1	Alto	Medio	Alto	Alto
Faena 2	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Faena 3	Medio	Alto	Bajo	Bajo
Faena 4	Bajo	Medio	Bajo	Bajo

La Faena 1 presenta un perfil asociado a una mayor incorporación del sistema en sus prácticas habituales y a una mayor formación de sus usuarios. Sus principales limitaciones se relacionan con la dificultad de acceso a los reportes y la baja utilidad atribuida a las plataformas disponibles.

En cuanto a la Faena 2, su perfil da cuenta de una presencia más acotada del sistema en las rutinas de trabajo, junto con un uso limitado de las herramientas disponibles y una formación reducida de las áreas que podrían utilizarlo.

Por otro lado, la Faena 3 presenta una mayor utilización de la información del sistema en comparación con otras capacidades evaluadas. Esta información se utiliza en decisiones de la operación, pero su obtención depende de solicitudes a Hexagon antes que de las plataformas disponibles, lo que limita la autonomía en la extracción de información. A ello se suma una formación acotada de los nuevos usuarios y de las áreas que podrían utilizar el sistema.

Finalmente, la Faena 4 presenta un perfil donde la información del sistema es considerada útil, aunque esto no se traduce en una utilización sostenida. No se solicitan reportes ni se declara un fomento del uso del sistema, a lo que se suma la ausencia de inducción para quienes se incorporan a utilizarlo.

5. Resultados

5.1. Alcance de la base analítica

Los resultados obtenidos respecto a la base analítica muestran que los registros extraídos desde el sistema no son equivalentes al número de interacciones utilizables. Asimismo, durante la preparación de los datos, y debido a la limpieza y consolidación de interacciones repetidas y registros recíprocos, se redujo el número de eventos consolidados. Finalmente, debido a la aplicación de criterios de clasificación de criticidad desarrollada, también disminuyó el número de conjunto de eventos elegibles, cifras que se presentan en la Tabla 12 a continuación.

Tabla 12: Trazabilidad de la base de análisis desde los registros CAS hasta los eventos elegibles. Fuente: Elaboración propia.

Faena	Registros CAS de entrada	Eventos consolidados	Eventos elegibles	Elegibles (% de consolidados)
Faena 1	237.024	203.178	63.558	31,28
Faena 2	111.556	93.414	23.432	25,08
Faena 3	533.041	474.123	202.356	42,68
Faena 4	186.401	148.127	23.011	15,53

La relación entre los registros de entrada, los eventos de consolidación y eventos finalmente elegibles muestra que no tienen la misma composición en todas las faenas. En particular, la Faena 4 es la que presenta proporcionalmente la mayor disminución de los eventos de entrada y consolidados, además de la menor proporción de eventos elegibles. Por otro lado, la Faena 3 tiene la mayor fracción de eventos elegibles para la clasificación. Para profundizar en el alcance de la información disponible en cada faena, se presenta la Tabla 13 que cuenta con las razones de la reducción durante la preparación de los eventos CAS.

Tabla 13: Origen de la reducción de registros durante la construcción de la base analítica. Fuente: Elaboración propia.

Faena	Sin identificación disponible	Duplicados excluidos	Registros integrados en una misma interacción	Reducción total
Faena 1	129	20.541	13.176	33.846
Faena 2	8.017	7.491	2.634	18.142
Faena 3	0	0	58.918	58.918
Faena 4	15.407	13.482	9.385	38.274

Considerando que las dos primeras causas, sin identificación disponible y duplicados exactos, corresponden a registros generados de forma incorrecta o incompleta, mientras que la otra agrupa registros que fueron generados por el sistema, pero que representan una misma interacción, en las Faenas 1, 2 y 4 la mayor parte de la reducción ocurre por problemas de generación, concentrando entre un 61% y un 86% de la reducción total de cada operación. Por otro lado, en la Faena 3 toda la reducción corresponde a la integración de registros, que representa un 11% de sus registros de entrada, frente a valores entre 2,4% y 5,6% en el resto de las faenas.

Una vez consolidados los registros, la clasificación de criticidad solo se aplica sobre los eventos que disponen de los antecedentes requeridos. La Tabla 14 presenta los criterios que no se encuentran disponibles en los eventos que no alcanzan esta condición, considerando que un mismo evento puede carecer de más de uno.

*Tabla 14: Limitaciones de información que condicionan la elegibilidad para la clasificación de criticidad potencial.
Fuente: Elaboración propia.*

Criterio(s) no disponible(s)	Faena 1	Faena 2	Faena 3	Faena 4
Geometría	91.196 (65,32%)	54.147 (77,37%)	259.731 (95,57%)	42.001 (33,57%)
Velocidad	19.279 (13,81%)	2.763 (3,95%)	5.578 (2,05%)	28.380 (22,68%)
Composición del par	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
TTC	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Geometría y velocidad	28.611 (20,49%)	10.558 (15,09%)	6.458 (2,38%)	54.732 (43,75%)
Velocidad y composición	323 (0,23%)	692 (0,99%)	0 (0,00%)	2 (<0,01%)
Geometría, velocidad y composición	211 (0,15%)	1.822 (2,60%)	0 (0,00%)	1 (<0,01%)
Total	139.620	69.982	271.767	125.116

La velocidad y la composición del par de equipos constituyen restricciones originadas en que el criterio no se pudo aplicar en la clasificación. En el caso de la velocidad, su ausencia evidencia un problema en el almacenamiento o conservación de la información del sistema, por lo que se trata de eventos que cumplían con las condiciones de interacción establecidas, pero cuya clasificación se ve afectada por una limitación del propio sistema. Este problema difiere entre operaciones, siendo marginal en la Faena 3 y presentando su mayor incidencia en la Faena 4,

donde la velocidad alcanza el 22,68% de los eventos no elegibles y 43,75% cuando se encuentra con la geometría, lo que limita la posibilidad de evaluar completamente estos eventos.

Por otro lado, la composición del par no supera el 3% en ninguna operación y siempre aparece acompañada de la restricción de otra variable. A diferencia de los casos anteriores, esta restricción tiene una explicación asociada a la definición del estudio, ya que responde a alertas generadas contra estructuras de la propia faena.

La geometría es la restricción predominante en las cuatro faenas, con proporciones que van desde un 77,32% hasta un 97,95% de los eventos no elegibles considerando todas sus combinaciones. Se distingue de las demás variables porque admite dos razones para que la clasificación no se produzca. La primera es la ausencia de las variables de movimiento requeridas, correspondiente a información que no se encuentra disponible dentro del registro histórico. La segunda es la falta de correspondencia entre las variables almacenadas y las clases de movimiento geométrico establecidas para el estudio, ya que la asignación requiere que los modos de movimiento, el ángulo relativo de aproximación y la diferencia de rumbo coincidan de manera simultánea con alguna de las clases definidas, situación que se puede dar en maniobras transicionales entre categorías. La Tabla 15 presenta el reparto entre ambas causas.

Tabla 15: Origen de las exclusiones asociadas a la clasificación geométrica. Fuente: Elaboración propia.

Causa de geometría no válida	Faena 1	Faena 2	Faena 3	Faena 4
Datos faltantes o no utilizables	7.260 (6,05%)	32.577 (48,97%)	7.431 (2,79%)	18.054 (18,66%)
Sin coincidencia con clasificación	112.758 (93,95%)	33.950 (51,03%)	258.758 (97,21%)	78.680 (81,34%)

En las Faenas 1, 3 y 4 predomina la falta de correspondencia con las clases definidas, con proporciones sobre el 80%, por lo que la exclusión geométrica de estas operaciones se encuentra asociada a la correspondencia con las reglas definidas y no a una pérdida de las variables requeridas. Por otro lado, en la Faena 2 los datos faltantes alcanzan un 48,97% por lo que la pérdida de información tiene una incidencia mayor sobre su base elegible.

Además de los antecedentes disponibles en cada evento, el alcance de la base depende de la cobertura efectiva de los registros dentro del periodo solicitado. La Tabla 16 presenta los días sin registros y con actividad atípicamente baja, junto con los periodos en que estos se concentran, contabilizados respecto de la ventana nominal de análisis.

Tabla 16: Continuidad y estabilidad temporal de los registros CAS durante la ventana de análisis. Fuente: Elaboración propia.

Faena	Días sin registros	Periodo(s) sin registros	Días con actividad atípicamente baja	Periodo(s) con actividad atípicamente baja
Faena 1	7	15–16 oct.; 18–22 oct.	26	10–12 sep.; 24 sep.; 27–28 sep.; 17 oct.; 23–29 oct.; 1–3 nov.; 5–12 nov.; 23 nov.
Faena 2	67	1 jul.–5 ago.; 7–26 ago.; 28 ago.–2 sep.; 5 días aislados	4	18 nov.; 27–28 nov.; 30 dic.
Faena 3	16	15–30 nov.	18	11 jul.; 31 jul.–2 ago.; 21–23 ago.; 25 ago.; 17–22 sep.; 6–7 dic.; 14–15 dic.
Faena 4	16	28 ago.; 16–30 nov.	16	8–9 jul.; 16 jul.; 12–13 ago.; 21–27 ago.; 29–31 ago.; 31 oct.

A pesar de que las discontinuidades están presentes en las cuatro faenas, es posible identificar distintos patrones en estas. En Faena 2, los días sin registros se concentran entre el 1 de julio y el 2 de septiembre, donde solo se registran 2 días con información, esto significa que los eventos inician efectivamente en septiembre, con solo cuatro días de actividad atípicamente baja.

En Faena 3 y 4 los vacíos se concentran en la segunda quincena de noviembre, coincidencia entre operaciones independientes que sugiere un origen asociado a la generación o entrega de los registros más que a condiciones propias de cada operación.

En cambio, la Faena 1 presenta el menor número de días sin registros, pero contiguos a jornadas con actividad atípicamente baja, conformando tramos de registro ausente o reducido entre el 15 y el 29 de octubre y entre el 1 y el 12 de noviembre, lo que indica que ambas condiciones corresponden a un mismo episodio de pérdida de registro, posiblemente originado en una limitación de la captura de datos que se manifiesta de forma parcial en algunas jornadas y total en otras.

A partir de estos resultados, los análisis posteriores se desarrollan sobre aquellos eventos que cuentan con información suficiente para ser caracterizados de manera consistente, mientras que las brechas identificadas en el registro constituyen un antecedente adicional respecto de la calidad de la información generada por el sistema.

5.2. Distribución de criticidad potencial y contextos de interacción

La Tabla 17 presenta la distribución de los eventos elegibles según el nivel de criticidad potencial asignado en cada faena.

Tabla 17: Distribución de eventos CAS según nivel de criticidad potencial por faena. Fuente: Elaboración propia.

Faena	Nivel 1, n (%)	Nivel 2, n (%)	Nivel 3, n (%)
Faena 1	49.493 (77,87%)	13.737 (21,61%)	328 (0,52%)
Faena 2	21.924 (93,56%)	1.500 (6,40%)	8 (0,03%)
Faena 3	146.226 (72,26%)	55.333 (27,34%)	797 (0,39%)
Faena 4	16.930 (73,57%)	6.049 (26,29%)	32 (0,14%)

Se observa que el Nivel 1 concentra la mayor proporción de los eventos elegibles en las cuatro faenas, lo cual resulta consistente con la dinámica operacional de una mina a cielo abierto, donde la circulación de equipos genera una elevada cantidad de encuentros y proximidades que forman parte del movimiento habitual de la operación, mientras que solo una parte de estos encuentros converge en condiciones de mayor exigencia consideradas en la clasificación. Esta diferencia se refleja en la menor proporción del Nivel 2, que representa desde un 6,40% en la Faena 2, hasta un 27,34% en la Faena 3, y se intensifica en el Nivel 3, que representa menos del 1% de los eventos elegibles en todas las operaciones.

Considerando los eventos Nivel 2 y Nivel 3, la Figura 9 presenta su participación en los cuatro contextos CAI de cada faena.



Figura 9: Distribución de eventos de Nivel 2 y Nivel 3 según Contexto Analítico de Interacción por faena. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de los eventos Nivel 2 y Nivel 3 entre los contextos CAI presenta diferencias entre las operaciones y entre ambos niveles de criticidad, observándose en la Faena 1 una mayor participación de CAI-1 para los eventos Nivel 2 y de CAI-2 para los Nivel 3, lo que sitúa respectivamente la mayor presencia de estos eventos en zonas de menor y mayor velocidad media; en la Faena 2, ambos niveles se concentran principalmente en contextos asociados a menor velocidad, con mayor participación de CAI-1 y CAI-3; mientras que en la Faena 3 los eventos Nivel 2 se presentan principalmente en CAI-2 y los Nivel 3 adquieren mayor presencia en CAI-1 y CAI-4, mostrando una distribución entre zonas de distinta velocidad media, comportamiento que también se observa en la Faena 4, donde los eventos Nivel 2 se concentran principalmente en CAI-1 y los Nivel 3 presentan una distribución más repartida entre los contextos. La Figura 10 complementa estas diferencias observadas en la velocidad media de las zonas, mostrando la condición de velocidad de los eventos Nivel 2 dentro de cada contexto CAI.

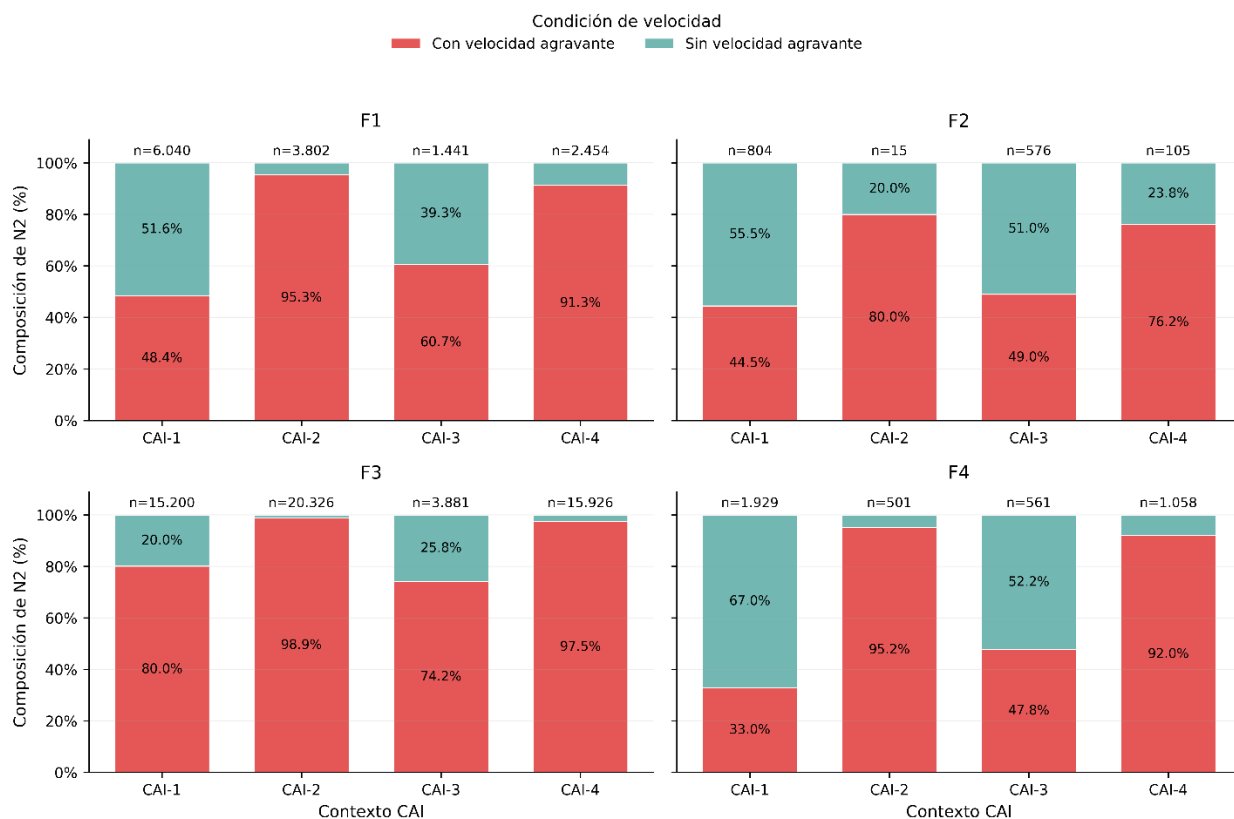


Figura 10: Comportamiento de la condición de velocidad en los distintos contextos operacionales. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar, la velocidad se presenta de manera distinta entre los contextos, los sectores donde la circulación habitual supera el umbral, CAI-2 y CAI-4, es coherente con que la velocidad agravante concentre la mayoría de los eventos, superando el 90% en las Faenas 1, 3 y 4, por lo que la lectura en estos casos se apoya en los otros criterios definidos. En CAI-1 y CAI-3, en cambio, esta condición presenta una mayor variación entre las faenas, alcanzando su menor participación en la Faena 4, con 33%, y valores mayores en la Faena 3, por lo que su presencia distingue los eventos que no son habituales para las velocidades asociadas a su sector. Estas diferencias orientan hacia qué condiciones dirigir la revisión en cada contexto, aspecto que se desarrolla al revisar los patrones de cada celda en la siguiente sección.

El caso de la Faena 2 responde directamente a los registros de velocidad obtenidos en la operación. En contraste con las demás faenas, el comportamiento de las interacciones se registra mayoritariamente bajo velocidades promedio que no superan los 20 km/h, condición que sitúa la mayor parte de sus celdas por debajo del umbral de velocidad utilizado para delimitar los CAI. Como consecuencia, sus eventos Nivel 2 y Nivel 3 se concentran en los contextos de baja velocidad, lo que explica la baja participación de CAI-2 y la alta presencia de CAI-3 observada en esta faena. Por otro lado, la Faena 3 presenta la situación opuesta, ya que sus celdas se

encuentran mayoritariamente por sobre el umbral, lo que se refleja especialmente en los eventos Nivel 2, cuya mayor participación se presenta en CAI-2. Ambos casos muestran que el umbral de velocidad debería definirse según las condiciones de circulación de cada operación, ya que un valor común no se ajusta de igual forma a faenas cuya circulación se desarrolla predominantemente por debajo o por sobre él.

También la lectura de la distribución por CAI debe considerar las limitaciones de información identificadas en la sección anterior, ya que la velocidad participa en la delimitación de los contextos y su ausencia se presenta en las cuatro operaciones. Esta condición alcanza su mayor magnitud en la Faena 4, por lo que su distribución se sostiene sobre un subconjunto más acotado de interacciones que el resto.

5.3. Patrones de interacción y orientación preventiva

A partir de la aplicación de los criterios definidos, se identificaron patrones de interacción en la mayoría de las celdas analizadas. Las celdas sin patrón corresponden a un 11,21% del total, pero concentran solo el 3,83% de los eventos Nivel 2 y Nivel 3, dado que se trata de ubicaciones con un número reducido de eventos en las que no es posible asignar un componente que domine el patrón de interacción, por lo que su caracterización no se desarrolla en esta sección.

La Figura 11 presenta la distribución espacial de los patrones identificados en cada faena, donde son una selección aleatoria de alguna zona para mantener el anonimato.

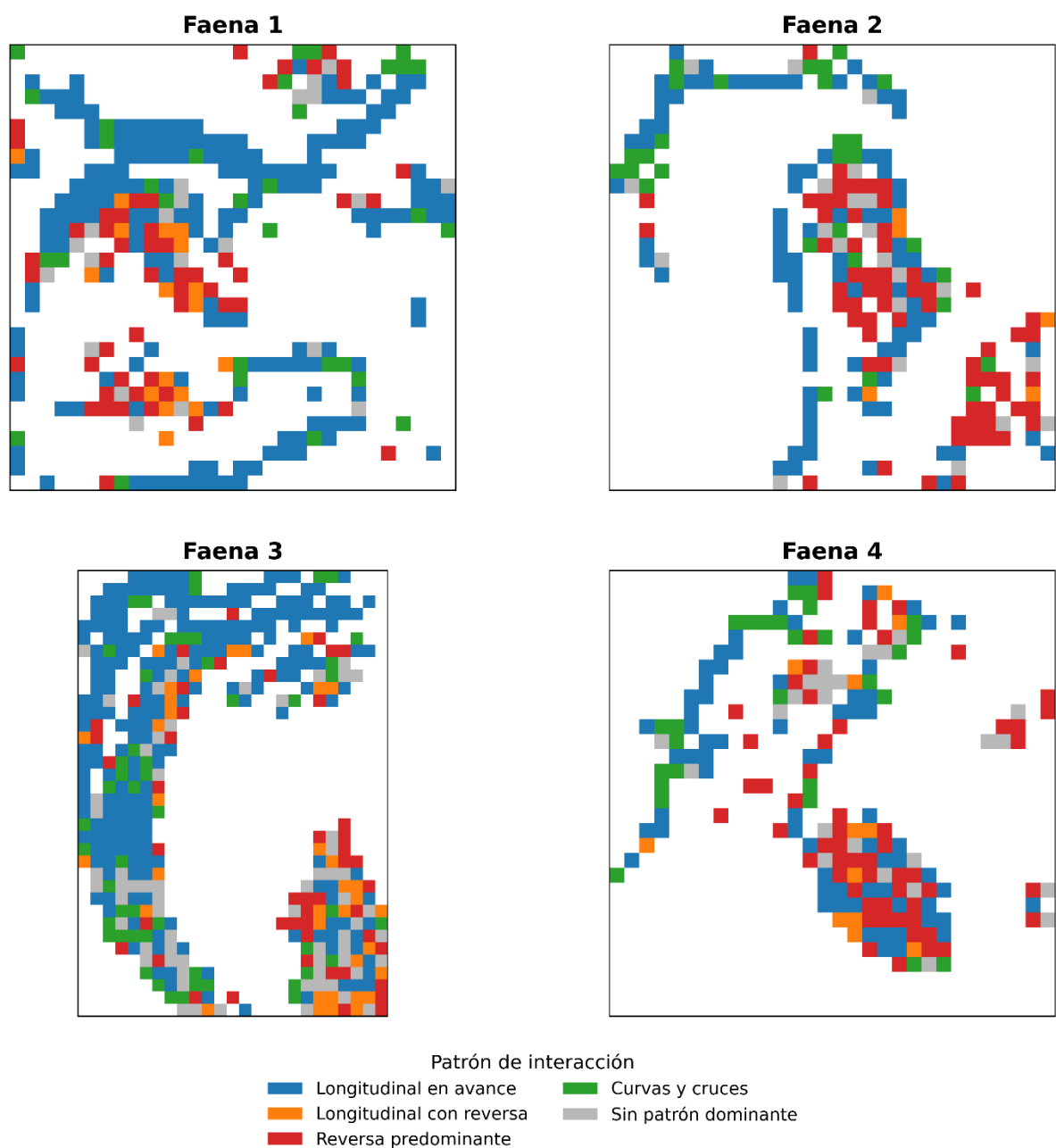


Figura 11: Organización espacial de los patrones de interacción en sectores seleccionados de las faenas. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que en los sectores representados la circulación longitudinal es la que presenta mayor continuidad espacial, formando secuencias de celdas que mantienen una misma configuración. En este sentido, los otros patrones tienen una aparición más focalizada y en varias zonas se encuentran intercalados con otras configuraciones, evidenciando que, aun cuando posteriormente los resultados puedan ser interpretados a una escala operacional mayor, una misma zona puede contener distintas formas de interacción.

Además de su distribución en la faena, cada patrón presenta condiciones propias en los eventos que lo componen. La Figura 12 caracteriza los eventos de Nivel 2 y Nivel 3 según su contexto CAI y la composición del par de equipos.

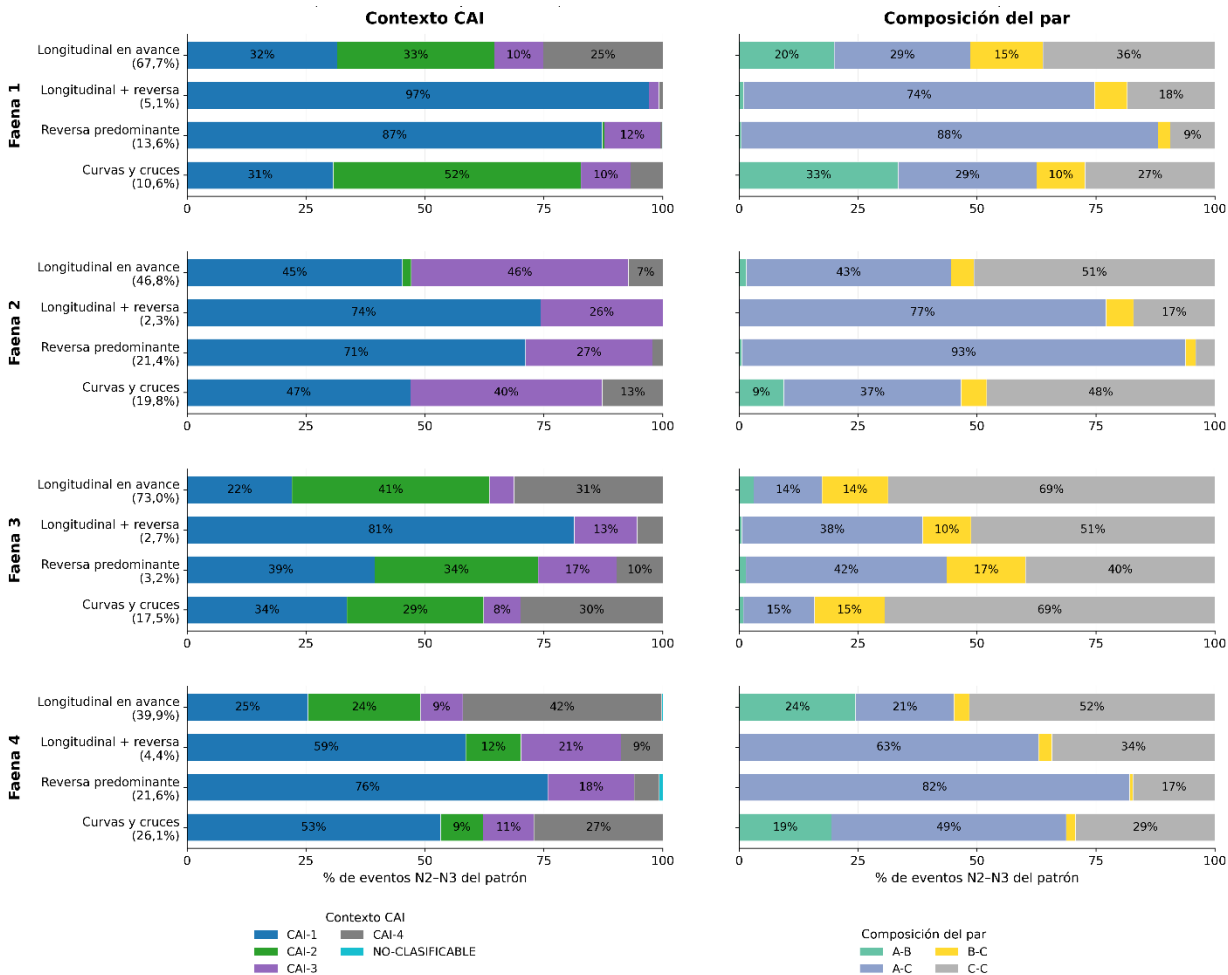


Figura 12: Caracterización operacional de los patrones de interacción según contexto y composición de equipos.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 12, la circulación longitudinal es el patrón predominante en todas las operaciones, aunque su participación varía considerablemente, desde un 39,9% en la Faena 4 hasta un 73,0% en la Faena 3. El resto de los patrones presentan una distribución que difiere según la operación, en las Faenas 1 y 2 adquieren mayor participación aquellos con componente de reversa, mientras que en la Faena 3 tienen mayor presencia las curvas y cruces, y la Faena 4 cuenta con ambos grupos en proporciones similares. Estas proporciones responden a la configuración operacional de cada faena, en particular a la cantidad de frentes de carguío y puntos de descarga activos respecto de la extensión de las rutas que los conectan.

Los patrones con componente de reversa presentan condiciones más definidas, ya que se concentran en CAI-1, con valores entre un 71% y un 97% en las Faenas 1,2 y 4, y la interacción

corresponde mayoritariamente a vehículos livianos y equipos pesados, situando al equipo de menor masa en ubicaciones donde los encuentros son recurrentes y los equipos pesados ejecutan maniobras. La circulación longitudinal, en cambio, se distribuye en los cuatro contextos y el predominante cambia según la operación, ya que la Faena 1 concentra un 33% en CAI-2, la Faena 2 un 46% en CAI-3 y la Faena 4 un 42% en CAI-4. La composición de los pares refuerza estas diferencias, dado que los vehículos livianos participan en cerca de la mitad de los eventos en las Faenas 1,2 y 4, mientras que en la Faena 3 lo hacen en menor proporción, donde las interacciones entre equipos pesados alcanzan un 69%.

Una diferencia similar se observa en curvas y cruces, en la Faena 1 destaca la interacción entre vehículos livianos y equipos de porte intermedio, con un 33%, mientras que en la Faena 4 predomina la interacción entre vehículos livianos y equipos pesados, con un 49%. Considerando una perspectiva preventiva, estas diferencias muestran que un mismo patrón no se presenta bajo las mismas condiciones entre operaciones, y que incluso los patrones con componente de reversa, que mantienen una condición común en las Faenas 1, 2 y 4, se apartan de ella en la Faena 3.

Estas condiciones se complementan con los criterios temporales y cinemáticos de los eventos. La Figura 13 presenta la categoría TTC y la condición de velocidad de cada patrón.

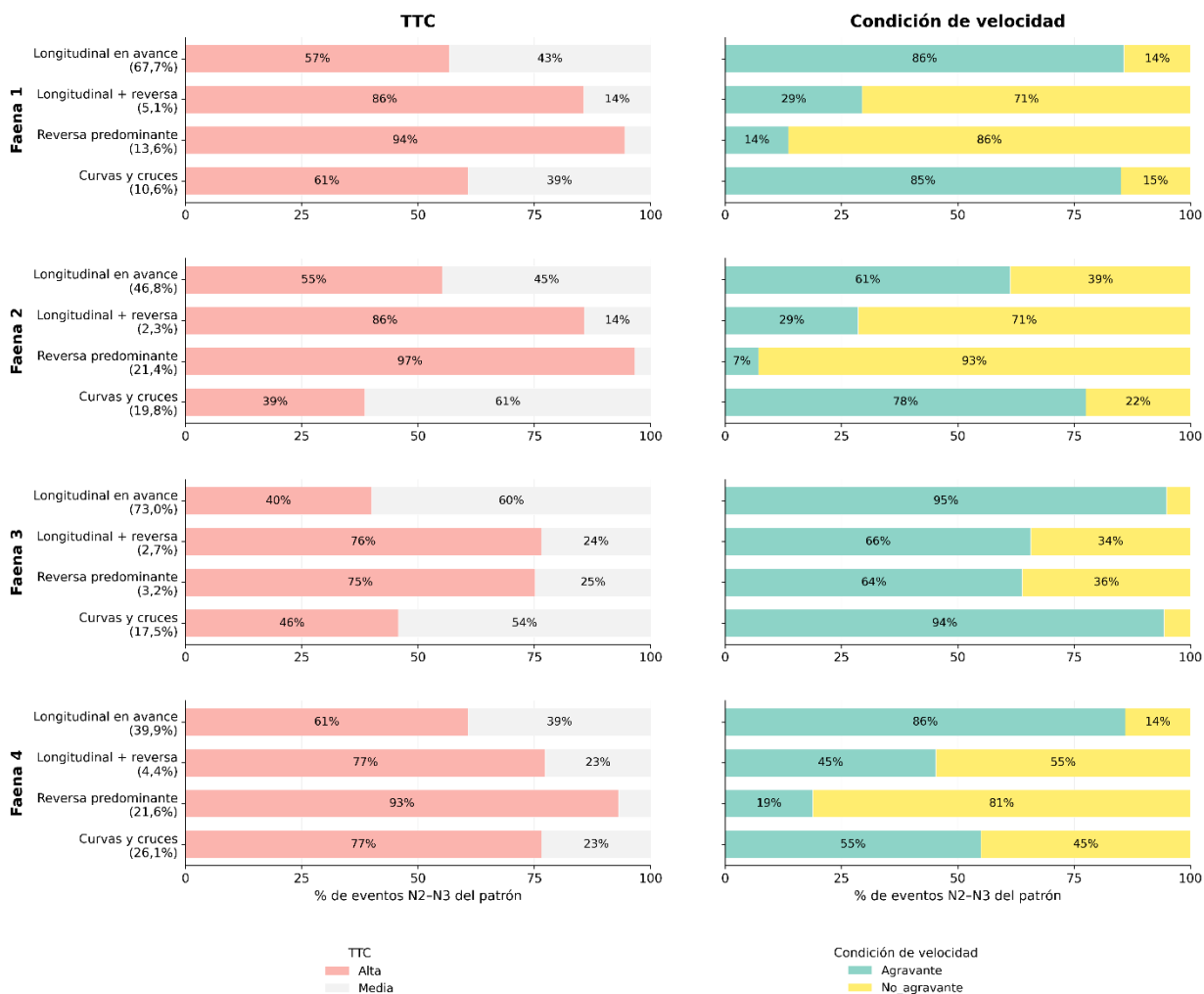


Figura 13: Caracterización temporal y cinemática de los patrones de interacción. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 13, los patrones de reversa presentan la mayor proporción de eventos con TTC Alta, condición que se destaca en la reversa predominante, donde alcanza entre un 75% y un 97%. Sin embargo, la velocidad agravante no acompaña la exigencia temporal, especialmente en las Faenas 1, 2 y 4, donde representa un 14%, 7% y 19% respectivamente. Este comportamiento resulta coherente con la operación minera, donde las maniobras de retroceso son habituales en zonas asociadas al carguío, descarga y actividades de apoyo, en las que el desplazamiento suele realizarse a velocidades más reducidas. Por esta razón, los patrones con reversa mantienen relevancia preventiva, debido a las condiciones de proximidad y respuesta asociadas a la maniobra, que en estas tres operaciones se producen mayoritariamente entre vehículos livianos y equipos pesados. La Faena 3 es una excepción, con un 5,9% al sumar ambas categorías y una alta presencia de TTC Alta acompañada de velocidad agravante, lo que vuelve a reflejar el mayor régimen de velocidad de esta operación.

En cambio, la circulación longitudinal presenta una participación mayoritaria de velocidad agravante en todas las faenas, mientras que el TTC se distribuye de forma más equilibrada entre las categorías Alta y Media, por lo que su exigencia proviene de las condiciones de circulación antes que de la proximidad entre equipos.

Las curvas y cruces presentan también una alta participación de velocidad agravante, aunque con mayores diferencias en la condición temporal entre operaciones. En particular, la Faena 4 alcanza un 77% de TTC Alta, diferenciándose de las Faenas 2 y 3, donde predomina el TTC Medio. Estos resultados demuestran que la exigencia difiere y responde exclusivamente a las condiciones particulares de cada operación.

Para llevar estos resultados a la gestión, la faena debe definir las zonas a revisar a partir de sus propios antecedentes operacionales, considerando qué sectores se encuentran activos, cuál es su uso previsto y qué controles ya se encuentran implementados. Una vez definida una zona, corresponde contrastar si las interacciones registradas son coherentes con la configuración operacional prevista o si existen encuentros que, de acuerdo con el funcionamiento definido para el sector, no deberían producirse. Dentro de cada zona, las celdas pueden revisarse según los patrones que se indican a continuación:

- Circulación longitudinal: Corresponde verificar si el espacio disponible, la visibilidad en la aproximación y la separación entre trayectorias son compatibles con las condiciones bajo las cuales los equipos se desplazan y se encuentran en la ubicación.
- Circulación longitudinal con reversa: Corresponde revisar cómo se resuelve la coexistencia entre equipos en desplazamiento y otros que realizan maniobras de retroceso, considerando la separación entre el flujo de circulación y el espacio utilizado para maniobrar, los puntos de acceso y salida y la posibilidad de advertir la maniobra con anticipación suficiente. A partir de ello, se puede determinar si se requieren ajustes en la delimitación del espacio o en la forma de acceso.
- Reversa predominante: Corresponde verificar cómo se encuentra organizado el espacio donde predominan las maniobras de retroceso, considerando su delimitación respecto de la circulación, las condiciones de acceso y permanencia de otros equipos y los controles aplicables mientras se desarrolla la maniobra.
- Curvas y cruces: Corresponde verificar cómo se organizan las trayectorias que confluyen desde direcciones distintas, considerando si existe una prioridad definida y reconocible entre los flujos y si la visibilidad disponible permite advertir oportunamente los movimientos que comparten el punto. Cuando la confluencia no corresponde a una

condición prevista de circulación, la revisión debe determinar bajo qué configuración se produce antes de definir las medidas necesarias.

Junto con el patrón identificado, la revisión debe considerar los antecedentes particulares de cada celda:

- Condición de velocidad: Cuando la condición de velocidad agravante adquiere una participación relevante, corresponde revisar si las condiciones asociadas al patrón continúan siendo compatibles con la velocidad a la que efectivamente se desarrollan las interacciones.
- Margen temporal: Una mayor presencia de condiciones temporalmente exigentes aumenta la atención sobre aquellos aspectos del patrón que condicionan el margen disponible para advertir y responder ante el encuentro.
- Composición de los equipos: La reiteración de determinadas combinaciones permite reconocer qué tipos de equipos comparten con mayor frecuencia la ubicación y orientar la revisión hacia las condiciones bajo las cuales se produce esa convivencia, especialmente cuando existen diferencias relevantes de porte o función.
- Cantidad y criticidad de los eventos: La cantidad de eventos permite distinguir celdas cuya caracterización se sostiene en pocas ocurrencias de aquellas donde las condiciones identificadas se presentan con mayor frecuencia durante el periodo analizado. La presencia de eventos Nivel 3 aumenta además la prioridad de revisión de la celda dentro de la zona definida por la faena.

6. Discusión

Los resultados obtenidos difieren de forma considerable entre las cuatro operaciones, aun tratándose del mismo sistema, el mismo periodo y la misma metodología; mostrando la influencia de las condiciones operacionales propias de cada faena sobre las interacciones registradas y las condiciones bajo las cuales se producen. Aspectos como las velocidades a las que se circula, los equipos que participan del tránsito y la disposición de los frentes y puntos de descarga respecto de las rutas que los conectan condicionan qué interacciones se producen y en qué condiciones.

Esto tiene consecuencias sobre los parámetros definidos para mantener un criterio común entre faenas, ya que estos no conservan la misma capacidad de diferenciación en todas, siendo el umbral de velocidad el caso más evidente al clasificar de manera distinta a operaciones que circulan a velocidades distintas. En consecuencia, lo que resulta transferible entre faenas es la estructura del procedimiento antes que los valores utilizados, y su aplicación en una nueva operación requiere reconocer previamente sus condiciones de circulación para interpretar correctamente los resultados.

El alcance de lo que puede obtenerse está limitado además por la evidencia disponible, ya que las diferencias de continuidad, completitud y capacidad de clasificación reducen la fracción de la operación que llega a caracterizarse, y los registros permiten reconocer dónde se concentran determinadas configuraciones sin establecer si estas responden al funcionamiento previsto del sector. Por ello, la priorización obtenida constituye una entrada a la revisión preventiva y no un diagnóstico, dado que avanzar hacia la definición de una medida requiere contrastar los resultados con la función del sector, sus condiciones de tránsito y los controles existentes.

Por último, la posibilidad de utilizar estos antecedentes de manera sostenida no depende únicamente de su nivel de detalle, ya que las condiciones declaradas por las operaciones analizadas muestran diferencias en las capacidades que sostienen el uso del sistema, desde la obtención de sus reportes hasta la incorporación de sus resultados a las decisiones de la operación, por lo que aprovechar los resultados de manera preventiva requiere fortalecer previamente esas capacidades dentro de la operación.

7. Conclusión

A partir del trabajo desarrollado, se concluye que los registros históricos del sistema CAS pueden utilizarse para apoyar la priorización preventiva de interacciones vehiculares, permitiendo ordenar y diferenciar las condiciones bajo las cuales se producen y evitando que la revisión dependa únicamente de la cantidad de alertas. La aplicación en distintas faenas mostró además que es posible mantener una estructura común de análisis, aunque algunos de sus parámetros dependen de las condiciones operacionales de cada faena.

El trabajo sobre registros reales mostró que la utilidad del análisis está condicionada por la información efectivamente disponible, ya que las diferencias en continuidad, completitud y capacidad de clasificación afectan el alcance de los resultados obtenidos. Esta condición hace necesario mantener seguimiento sobre la calidad y cobertura de los registros cuando el análisis se utilice de manera sostenida.

Los antecedentes obtenidos permiten orientar la revisión hacia condiciones de mayor interés preventivo, pero no establecer directamente su origen ni las medidas correspondientes, por lo que estas decisiones requieren ser abordadas dentro del proceso de revisión de cada faena.

Como desarrollo posterior, resulta relevante validar la criticidad potencial mediante antecedentes independientes de la operación, calibrar los parámetros que dependen del contexto y evaluar la estabilidad de las caracterizaciones en periodos más extensos. La incorporación de información sobre tránsito, configuración operacional y controles implementados permitiría ampliar el análisis hacia el seguimiento de las condiciones identificadas y evaluar su evolución después de una intervención.

8. Referencias

- Afolayan, A., Easa, S. M., Abiola, O. S., Alayaki, F. M., & Folorunso, O. (2022). GIS-based spatial analysis of accident hotspots: A Nigerian case study. *Infrastructures*, 7(8), 103. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7080103>
- Ammoun, S., & Nashashibi, F. (2009). Real time trajectory prediction for collision risk estimation between vehicles. En 2009 IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (pp. 417–422). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCP.2009.5284727>
- Bellanca, J. L., Ryan, M. E., Orr, T. J., & Burgess-Limerick, R. (2021). Why do haul truck fatal accidents keep occurring? *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(2), 1019–1029. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00410-1>
- Dantas, G. A. S. A., Franca, A., & de Tomi, G. (2025). From alerts to action: Data-driven evaluation of collision risks in open-pit mining operations. *Mining, Metallurgy & Exploration*. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01384-0>
- Earth Moving Equipment Safety Round Table. (s. f.). Vehicle Interaction Control Improvement (VICI) program. Recuperado el 13 de octubre de 2025, de <https://emesrt.org/vehicle-interaction-control-improvement/>
- Evans, L., & Frick, M. C. (1993). Mass ratio and relative driver fatality risk in two-vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 25(2), 213–224. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90062-2](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90062-2)
- Global Mining Guidelines Group. (2024). Guideline for the implementation of autonomous systems in mining (Version 2). Global Mining Guidelines Group. https://gmgggroup.org/wp-content/uploads/2024/08/GUIDELINE_Implementation-of-Autonomous-Systems-1.pdf
- Guenther, N., & Salow, H. (2012). Collision avoidance and operator guidance: Innovating mine vehicle safety. Queensland Mining Industry Health and Safety Conference. https://www.qmihconference.org.au/wp-content/uploads/qmihsc-2012-writtenpaper-guenther_salow.pdf
- Hrica, J. K., Bellanca, J. L., Benbourenane, I., Carr, J. L., Homer, J., & Stabryla, K. M. (2022). A rapid review of collision avoidance and warning technologies for mining haul trucks. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(4), 1357–1389. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00633-w>
- Imam, M., Baïna, K., Tabii, Y., Ressami, E. M., Adlaoui, Y., Benzakour, I., & Abdelwahed, E. H. (2023). The future of mine safety: A comprehensive review of anti-collision systems based on computer vision in underground mines. *Sensors*, 23(9), 4294. <https://doi.org/10.3390/s23094294>

International Council on Mining and Metals. (2015). Health and safety critical control management: Good practice guide. ICMM.

Kononen, D. W., Flannagan, C. A. C., & Wang, S. C. (2011). Identification and validation of a logistic regression model for predicting serious injuries associated with motor vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.07.018>

Moniri-Morad, A., Shishvan, M. S., Aguilar, M., Goli, M., & Sattarvand, J. (2024). Powered haulage safety, challenges, analysis, and solutions in the mining industry: A comprehensive review. *Results in Engineering*, 21, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101684>

Organización Internacional del Trabajo. (2015). La minería: un trabajo peligroso. <https://www.ilo.org/es/resource/la-mineria-un-trabajo-peligroso>

Organización Internacional del Trabajo. (2018). Seguridad y salud en las minas a cielo abierto: Repertorio de recomendaciones prácticas (2.^a ed. rev.). https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40ed_dialogue/%40sector/documents/normativeinstrument/wcms_617125.pdf

PricewaterhouseCoopers. (2019). Mine 2019: Resourcing the future. https://www.pwc.com/cl/es/publicaciones/assets/2019/Mine_2019.pdf

Rosén, E., Stigson, H., & Sander, U. (2011). Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.04.003>

Ruff, T. M., & Holden, T. P. (2003). Preventing collisions involving surface mining equipment: A GPS-based approach. *Journal of Safety Research*, 34(2), 175–181. [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(02\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00074-9)

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2025). Accidentabilidad minera. Gobierno de Chile. https://buenaventura.com/wp-content/uploads/2025/07/Sernageomin_Chile_Accidentes-Fatales-en-Mineria-Septiembre-2025.pdf

Shimaponda-Nawa, M., Nwaila, G., Zhang, S., & Bourdeau, J. (2023). A framework for measuring the maturity of real-time information management systems (RTIMS) in the mining industry. *The Extractive Industries and Society*, 16, 101368. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101368>

Sobhani, A., Young, W., Logan, D., & Bahrololoom, S. (2011). A kinetic energy model of two-vehicle crash injury severity. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 741–754. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.021>

Swanson, L. R., Bellanca, J. L., & Helton, J. (2019). Automated systems and trust: Mineworkers' trust in proximity detection systems for mobile machines. *Safety and Health at Work*, 10(4), 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2019.09.003>

Van de Kamp, H. (2020). Collision avoidance in surface mines: A server-based approach [Master of Science thesis, Delft University of Technology].

Verster, J., Roux, P., Magweregwe, F., de Ronde, W., Crafford, G., Mashaba, M., Turundu, S., Mpofu, M., Prinsloo, J., Ferreira, P., & Brodner, H. (2023). A digital twin framework to support vehicle interaction risk management in the mining industry. *MATEC Web of Conferences*, 388, 11002. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202338811002>

Young, A., & Rogers, W. P. (2019). A review of digital transformation in mining. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(4), 773–792. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00103-w>

9. Anexo

9.1. Encuesta de Reportabilidad y Uso Operacional del CAS

P1. ¿Con qué frecuencia solicita reportes del sistema CAS-10 elaborados por el equipo de Hexagon para apoyar su trabajo en la operación?

1. Diario
2. Semanal
3. Quincenal
4. Mensual
5. Solo en caso de incidentes o situaciones particulares

P2. ¿Ha encontrado útiles los reportes generados por el equipo de Hexagon para su trabajo?

1. Sí
2. No

P3. ¿Qué tan útiles le resultan en general los reportes entregados por el equipo de Hexagon para su gestión operativa?

1. Muy útil
2. Bastante útil
3. Medianamente útil
4. Poco útil
5. Nada útil

P4. ¿Cuál de las siguientes plataformas proporcionadas por Hexagon utiliza con mayor frecuencia para extraer reportes dentro de su entorno tecnológico de trabajo?

1. MineEnterprise
2. CAS Analytics
3. Ambos sistemas
4. No se han utilizado estos sistemas

P5. ¿Con qué frecuencia extrae reportes del sistema CAS-10 a través de las plataformas MineEnterprise o CAS Analytics?

1. Diario
2. Semanal
3. Quincenal
4. Mensual
5. Solo en caso de incidentes o situaciones puntuales

P6. ¿Ha encontrado útiles los reportes entregados por las plataformas “MineEnterprise” o “CAS Analytics” para su gestión en la operación?

1. Sí
2. No

P7. ¿Qué tan útiles le resultan generalmente los reportes generados por “MineEnterprise” o “CAS Analytics”?

1. Muy útil
2. Bastante útil
3. Medianamente útil
4. Poco útil
5. Nada útil

P8. ¿Para qué tipo de decisiones ha utilizado la información proveniente del sistema CAS?

1. Cambios operacionales (rutas, velocidades, condiciones de tránsito)
2. Medidas de seguridad o control de riesgos
3. Capacitación o retroalimentación a operadores
4. Soporte a investigaciones de incidentes
5. Evaluación de desempeño de equipos o áreas
6. Justificación de inversiones o mejoras
7. Otras
8. No se han utilizado los datos del CAS en decisiones

P9. ¿Se ha utilizado la información del CAS para capacitar o dar retroalimentación a operadores?

1. Sí
2. No

P10. ¿Con qué frecuencia se realiza esta práctica?

1. Diario
2. Semanal
3. Quincenal
4. Mensual
5. Solo en ocasiones puntuales

P11. ¿Dispone de acceso directo a los reportes del sistema CAS-10 cuando requiere consultar información para su gestión?

1. Sí
2. No

P12. ¿Cómo evaluaría la facilidad de acceso a dichos reportes?

1. Muy fácil
2. Fácil
3. Ni fácil ni difícil

4. Difícil
 5. Muy difícil
- P13. ¿Se han discutido reportes del sistema CAS en reuniones operativas o de seguridad?
1. Sí
 2. No
- P14. ¿Con qué frecuencia se discuten reportes del CAS?
1. Diario
 2. Semanal
 3. Quincenal
 4. Mensual
 5. Solo en casos de incidentes o situaciones puntuales
- P15. En la faena, ¿la información del sistema CAS se comparte o se utiliza en otras áreas además de la suya?
1. Sí
 2. No
- P16. ¿Con qué frecuencia se comparte la información proveniente del sistema CAS-10 con otras áreas de la operación?
1. Diario
 2. Semanal
 3. Quincenal
 4. Mensual
 5. Solo en casos de incidentes o situaciones puntuales
- P17. ¿Considera que en su operación se fomenta activamente el uso del sistema CAS para apoyar la toma de decisiones?
1. Sí, totalmente
 2. Bastante
 3. Medianamente
 4. Poco
 5. No, en absoluto
- P18. ¿Qué tan efectivo considera que ha sido el sistema CAS para cumplir con su función principal de advertir y prevenir riesgos de colisión entre equipos móviles en la operación?
1. Muy efectivo
 2. Efectivo
 3. Medianamente efectivo
 4. Poco efectivo

5. Nada efectiva

9.2. Encuesta de Capacitación y Gestión de Soporte del CAS

- P19. ¿En su experiencia, se han realizado capacitaciones sobre el sistema CAS para distintas áreas de la operación (más allá de los operadores)?
1. Sí
 2. No
- P20. ¿Qué áreas de la operación, según su conocimiento, han recibido capacitación sobre el sistema CAS?
1. Operaciones
 2. Mantenimiento
 3. Seguridad
 4. Ingeniería
 5. Supervisión
 6. Otras
- P21. ¿Considera que las personas que han sido capacitadas en el sistema CAS demuestran una buena comprensión de su funcionamiento y utilidad?
1. La mayoría demuestra una buena comprensión
 2. Algunas personas lo entienden, otras no
 3. No comprenden bien el sistema
- P22. ¿Con qué frecuencia se incorporan nuevas personas con acceso y uso de los registros del sistema CAS?
1. Muy frecuentemente (cada mes o menos)
 2. Frecuentemente (cada 2 a 3 meses)
 3. Ocasionalmente (cada 6 meses)
 4. Rara vez (menos de una vez al año)
 5. Nunca
- P23. Cuando llega alguien nuevo que debe utilizar información del sistema CAS, ¿quién realiza la capacitación o inducción?
1. El equipo de Hexagon en faena
 2. Personal de la operación o supervisores de la faena
 3. Área de capacitación interna de la empresa
 4. No se realiza
- P24. ¿Considera que la capacitación recibida por nuevos usuarios sobre el sistema CAS es suficiente para su correcta comprensión y uso?
1. Sí, completamente suficiente

2. En parte, se puede mejorar
 3. No, es insuficiente
- P25. ¿La llegada de nuevos usuarios afecta la calidad o frecuencia del uso del sistema CAS en su área?
1. Sí, positivamente (mejora el uso)
 2. No, no afecta
 3. Sí, negativamente (disminuye el uso o calidad)
- P26. ¿Ha tenido que realizar alguna solicitud relacionada con el mantenimiento o soporte del hardware del sistema CAS?
1. Sí
 2. No
- P27. ¿Cómo calificaría la comunicación con el equipo de soporte o mantenimiento cuando se presentan problemas o se requiere atención?
1. Muy buena
 2. Buena
 3. Aceptable
 4. Deficiente
 5. Muy deficiente
- P28. ¿Cómo evaluaría la facilidad del proceso para solicitar mantenimiento o soporte del hardware?
1. Muy fácil
 2. Fácil
 3. Ni fácil ni difícil
 4. Difícil
 5. Muy difícil
- P29. ¿Cómo calificaría, en general, los tiempos de respuesta ante solicitudes o problemas relacionados con el sistema CAS?
1. Menos de 6 horas
 2. 6 a 12 horas
 3. 12 a 24 horas
 4. 1 a 3 días
 5. Más de 3 días

9.3. Agrupación de preguntas por dimensión analítica

Tabla 18: Agrupación de preguntas por dimensión analítica. Fuente: Elaboración propia.

Dimensión	Preguntas
Uso operacional del sistema CAS	P1, P17, P18, P21, P22, P25
Gestión de información y análisis	P2, P3, P6, P7, P8, P11, P12, P13, P14, P16
Aprendizaje organizacional y mejora continua	P9, P10, P19, P20, P23, P24
Integración y madurez digital	P4, P5, P15, P26, P27, P28, P29

9.4. Matriz de codificación de respuestas

El procesamiento de las respuestas se realiza mediante una codificación común en escala de 0 a 1, en la que los valores más altos representan un mayor nivel de desarrollo declarado respecto de la práctica evaluada.

9.4.1 Clasificación de preguntas según tipo de codificación

Tabla 19: Clasificación de preguntas según tipo de codificación. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de escala	Preguntas
Ordinal (5 niveles)	P1, P3, P5, P7, P10, P12, P14, P16, P17, P18, P22, P27, P28, P29
Ordinal (3 niveles)	P21, P24, P25
Binaria	P2, P6, P9, P11, P13, P15, P19, P26
Binaria por selección	P4, P8, P23
Multiselección normalizada	P20

9.4.2 Codificación de escalas utilizadas

Tabla 20: Codificación de escalas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de escala	Codificación aplicada
Ordinal	Se asigna un valor normalizado entre 0 y 1 según la posición ordinal de la respuesta seleccionada dentro de una escala de 3 o 5 niveles.
Binaria	Sí = 1; No = 0
Binaria por selección	Se asigna 0 cuando la alternativa seleccionada corresponde a una opción de no uso, no realización o ausencia de implementación; en los demás casos se asigna 1.

Multiselección	Se asigna un valor proporcional al número de alternativas seleccionadas respecto del total de opciones consideradas en la pregunta.
----------------	---

Para las preguntas clasificadas como escalas ordinales, la transformación a la escala normalizada se realizó mediante la siguiente expresión:

$$Score = \frac{L - r}{L - 1}$$

Donde:

- r corresponde a la posición ordinal de la respuesta seleccionada
- L corresponde al número total de niveles de la escala

Algunas preguntas del instrumento dependen de respuestas previas o solo son aplicables bajo determinadas condiciones. En estos casos, la ausencia de respuesta no se interpreta automáticamente como bajo desempeño. Cuando corresponde a una condición de no aplicabilidad, la respuesta se excluye del cálculo de la dimensión respectiva.

Una vez codificadas las respuestas, se calcula un valor para cada dimensión analítica, obtenido como el promedio de las respuestas válidas asociadas a la dimensión correspondiente, manteniendo la escala de 0 a 1. Los valores se mantienen como resultados independientes por dimensión, dado que la lectura posterior se orienta a reconocer qué aspectos presentan un menor desarrollo relativo en cada faena.

Para facilitar la lectura de resultados, los valores obtenidos se interpretan mediante tres rangos operativos: desarrollo bajo, medio y alto, delimitados por los umbrales de 0,50 y 0,75.

El umbral de 0,50 se utiliza como punto de separación entre desarrollo bajo y desarrollo medio, ya que representa la mitad de la escala normalizada de 0 a 1. Por debajo de este valor, la dimensión evaluada refleja una presencia limitada, discontinua o poco sistemática de las prácticas declaradas. En cambio, valores iguales o superiores a 0,50 indican que existen antecedentes suficientes para reconocer un desarrollo parcial de la práctica evaluada, aunque no necesariamente consolidado.

El umbral de 0,75 se utiliza para distinguir el desarrollo medio del desarrollo alto, debido a que representa tres cuartas partes de la escala normalizada. Por sobre este valor, la dimensión evaluada presenta una aplicación declarada de manera más consistente, mientras que los valores intermedios reflejan prácticas presentes de forma parcial.

9.5. Variables de origen utilizadas del dataset CAS

Tabla 21: Variables de origen utilizadas del dataset CAS. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Descripción	Tipo de dato	Unidad / categoría
date	Fecha del registro del evento	Fecha	AAAA-MM-DD
start_time	Fecha y hora de inicio del evento	Fecha-hora	AAAA-MM-DD HH:MM:SS
end_time	Fecha y hora de término del evento	Fecha-hora	AAAA-MM-DD HH:MM:SS
tipo_equipo	Tipo de equipo que registra la alerta	Texto	Categoría de equipo
equipo	Identificador del equipo que registra la alerta	Texto	Código
move_mode	Modo de movimiento del equipo que registra la alerta	Texto	Categoría
aggressor_speed	Velocidad del equipo que registra la alerta	Numérico	km/h
opp_tipo_equipo	Tipo de equipo oponente	Texto	Categoría de equipo
opp_equipment	Identificador del equipo oponente	Texto	Código
opp_move_mode	Modo de movimiento del equipo oponente	Texto	Categoría
opp_speed	Velocidad del equipo oponente	Numérico	km/h
severity	Nivel de severidad registrado por el sistema	Texto	Categoría
latitude	Latitud del evento	Numérico	Grados decimales

Longitude	Longitud del evento	Numérico	Grados decimales
relative_bearing	Ángulo relativo entre equipos	Numérico	Grados
heading_difference	Diferencia de orientación entre equipos	Numérico	Grados
faena	Faena a la que pertenece el registro	Texto	Categoría

9.6. Variables derivadas utilizadas en el análisis

Tabla 22: Variables derivadas utilizadas en el análisis. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Descripción	Tipo de dato
celda_x	Índice longitudinal de la celda de la malla espacial a la que se asigna el evento.	Numérico entero
celda_y	Índice latitudinal de la celda de la malla espacial a la que se asigna el evento.	Numérico entero
zona_velocidad	Clasificación de la celda según la condición de velocidad media utilizada para la contextualización operacional.	Texto
zona_densidad_eventos	Clasificación de la celda según la concentración de eventos registrados.	Texto
clasificacion_emesrt	Clase geométrica de interacción asignada al evento según la clasificación basada en EMESRT.	Texto
criticidad_geometrica	Nivel de criticidad asociado a la clase geométrica de interacción.	Texto

criticidad_interaccion_base	Nivel de criticidad asociado a la composición del par de equipos involucrados.	Texto
velocidad_referencia	Velocidad de referencia definida para evaluar la condición cinemática del evento.	Numérico
condicion_velocidad	Condición asignada al evento según si la velocidad de referencia supera o no el umbral definido.	Texto / Booleano
contexto_CAI	Contexto Analítico de Interacción asignado al evento según las características de la celda en que se registra.	Texto
nivel_criticidad_potencial	Nivel de criticidad potencial asignado al evento a partir de la combinación de los criterios definidos.	Texto

9.7. Clases de interacción utilizadas en la clasificación EMESRT

Tabla 23: Clases de interacción utilizadas en la clasificación EMESRT. Fuente: Elaboración propia.

Código	Clase	Descripción breve	Grupo
L1	Head-on	Aproximación frontal entre equipos	Longitudinal
L2	Backup	Aproximación asociada a maniobra de retroceso	Longitudinal
L3	Reverse-on	Aproximación longitudinal con oposición de rumbo en reversa	Longitudinal
L4	Dovetailing	Aproximación convergente en una misma dirección general	Longitudinal
L5	Passing Head-on	Cruce longitudinal cercano con sentido opuesto	Longitudinal

L6	Passing Reverse-on	Cruce longitudinal cercano con componente de reversa	Longitudinal
L7	Overtaking	Alcance de un equipo sobre otro en una misma dirección	Longitudinal
C1	Curving Head-on	Aproximación frontal en trayectoria curva	Curva
C2	Curving Dovetail	Aproximación convergente en curva	Curva
C3	Curving Reverse-on	Aproximación en curva con componente de reversa	Curva
T1	Merge	Convergencia de trayectorias hacia una misma vía o dirección	Transversal
T2	Crossover	Cruce de trayectorias	Transversal
T3	Junction	Encuentro en unión o bifurcación de trayectorias	Transversal
T4	Intersection	Encuentro en intersección de trayectorias	Transversal