

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**MEJORA DEL PROCESO DE ABASTECIMIENTO DE  
CEMENTO A GRANEL DE LA UNIDAD MINERA  
TAMBOMAYO A TRAVÉS DE UN MODELO  
OPERACIONAL ALTERNATIVO**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniería Industrial

**AUTORES**

Francisco Franco Conroy (Código: 201510120)

Mariana Arriz Jorquiera (Código: 201510164)

**ASESORES**

Claudia Fausta Antonini Bova (ORCID: 0000-0003-0008-5879)

Fabien Yves Paul Cornillier (ORCID: 0000-0002-7240-6830)

Lima – Perú

2021

La tesis

**MEJORA DEL PROCESO DE ABASTECIMIENTO DE CEMENTO A GRANEL  
DE LA UNIDAD MINERA TAMBOMAYO A TRAVÉS DE UN MODELO  
OPERACIONAL ALTERNATIVO**

Ha sido aprobada por:



.....  
Oscar Gamonal Pajares



.....  
Luisa Magali Carrión Rojas



.....  
José Gaspar De La Puente Maldonado

*Dedicatoria:*

Esta tesis va dedicada a nuestros padres, por habernos educado con los valores que ahora tenemos y por haber confiado en nosotros desde que tenemos memoria. A nuestros hermanos y hermanas, que nos motivan todos los días a seguir adelante. Y a nuestros abuelos, por su apoyo incondicional en cada paso que damos.

Somos muy afortunados y estamos muy orgullosos de las familias que tenemos, es para ellos que va este logro.

*Agradecimientos:*

A nuestros asesores Claudia Antonini y Fabien Cornillier, porque sus conocimientos y su apoyo intensivo cada semana fueron sustanciales para concluir con éxito esta tesis.

A Juan Diego y Benjamín Franco, de la empresa FC Transportes. Por su entusiasmo y apoyo desde que nació este proyecto, y por brindarnos toda la información necesaria para desarrollarlo.

A Roque Benavides, de la empresa Buenaventura. Por confiar en nosotros y en este proyecto, y permitirnos utilizar información de la empresa.

A todos los profesores y personal administrativo de la Universidad de Ingeniería y Tecnología, especialmente al profesor José Larco y a Verónica Lunga, por su apoyo desde nuestros primeros pasos en la carrera. Un agradecimiento especial para la profesora Eunice Villicaña, por su motivación, guía, y apoyo constante durante los últimos 5 años.



# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	7
INTRODUCCIÓN .....	9
CAPÍTULO I .....	13
MARCO TEÓRICO.....	13
1.1. Implementación de un <i>hub</i> logístico .....	13
1.1.1. Definición de <i>hub</i> logístico .....	13
1.1.2. Clasificación y estructura de un <i>hub</i> logístico.....	14
1.1.3. Objetivos de un <i>hub</i> logístico en la cadena de suministro de una mina .....	15
1.1.4. Características y funciones de un <i>hub</i> logístico como centro de distribución centralizado.....	16
1.2. Variabilidad en la demanda de suministros en una mina .....	17
1.3. Toma de decisiones bajo incertidumbre .....	17
1.3.1. Análisis de decisión multicriterio (MCDA) .....	18
1.3.2. Métodos de evaluación multicriterio .....	20
1.3.3. Método Electre .....	23
1.4. Simulación de escenarios.....	28
1.4.1. Herramientas de simulación .....	29
1.5. Conceptos básicos de minería.....	30
1.5.1. Proceso de extracción de una mina subterránea.....	37
1.6. Accidentalidad en minas.....	38
1.6.1 Clasificación de los accidentes de acuerdo a la gravedad .....	41

CAPÍTULO II.....	43
METODOLOGÍA.....	43
2.1. Paso a paso del proceso a seguir .....	43
2.2. Variables contextuales a considerar .....	55
2.3. Retos en la implementación de un <i>hub</i> logístico en la UM Tambomayo.....	55
2.4. Fuentes de información e instrumentos de medición .....	56
CAPÍTULO III .....	58
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
3.1. Análisis de datos .....	58
3.2. Ubicación escogida a través del método Electre I .....	63
3.3. Simulación de escenarios.....	65
3.4. Análisis y comparación de escenarios .....	68
3.5. Análisis y estimación de costos de inversión y operativos.....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los métodos de evaluación multicriterio	22
Tabla 2. Características de los diferentes métodos Electre	24
Tabla 3. Perú en el Ranking de Producción Minera	31
Tabla 4. Ratio de minería no formal registrada / no registrada	34
Tabla 5. Personal con accidentes incapacitantes en Buenaventura 2021	39
Tabla 6. Peso de importancia para cada criterio	48
Tabla 7. Características de las opciones según los criterios	48
Tabla 8. Escala cualitativa de los criterios.	49
Tabla 9. Relación entre valores de calificación cualitativa y cuantitativa	49
Tabla 10. Valores cualitativos de cada opción según los criterios definidos	50
Tabla 11. Valores cuantitativos de cada opción según los criterios definidos	50
Tabla 12. Matriz de concordancia	51
Tabla 13. Matriz de discordancia	51
Tabla 14. Matriz AMEF para riesgos en la mina	52
Tabla 15. Matriz AMEF para riesgos en tránsito a la mina	53
Tabla 16. Tiempo en segundos y horas entre pedidos que salen de Yura	62
Tabla 17. Tiempo en segundos y horas entre unidades descargadas	62
Tabla 18. Matriz de concordancia - primer análisis	63
Tabla 19. Matriz de discordancia - primer análisis	63



Tabla 20. Matriz de concordancia - segundo análisis	64
Tabla 21. Matriz de discordancia - segundo análisis	64
Tabla 22. Matriz de concordancia - tercer análisis	65
Tabla 23. Matriz de discordancia - tercer análisis	65
Tabla 24. Resumen de resultados	70
Tabla 25. Estimación de costos operativos y de inversión	71
Tabla 26. Flujo de caja de la implementación del <i>hub</i>	72

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del funcionamiento del método Electre	25
Figura 2. Modelos de simulación	28
Figura 3. Métodos en modelos de optimización de simulación	29
Figura 4. Estratificación de la Minería	32
Figura 5. Titulares Mineros por Estrato	32
Figura 6. Producción de oro formal e informal en Perú	34
Figura 7. Minería superficial	36
Figura 8. Minería subterránea	36
Figura 9. Extracción en una mina subterránea	37
Figura 10. Accidentes por causa en los últimos 10 años	39
Figura 11. Frecuencia por tipos de accidentes 2021 de la empresa Buenaventura	40
Figura 12. Pirámide Frank Bird	41
Figura 13. Vista satelital de la UM Tambomayo y las 4 posibles ubicaciones del <i>hub</i>	47
Figura 14. Días de <i>stand by</i> y cantidad de viajes	58
Figura 15. Porcentaje del número de unidades descargadas por día	60
Figura 16. Análisis de unidades en cadena	60
Figura 17. Tiempo de ruta a mina	61
Figura 18. Bosquejo de escenario sin <i>hub</i>	66
Figura 19. Bosquejo de escenario con <i>hub</i>	67
Figura 20. Costos de <i>stand by</i>	69

Figura 21. Tiempo de respuesta a mina	69
Figura 22. Riesgos por estadía en mina	70
Figura 23. VAN frente a tasas de interés	73
Figura 24. Ubicación satelital del caserío, posible terreno para el <i>hub</i>	75

## RESUMEN

La empresa Buenaventura es una de las compañías mineras más representativas del Perú. Entre sus Unidades Mineras, una de las principales es Tambomayo. Esta mina subterránea cuenta con el cemento como suministro crítico y necesario para la etapa de exploración y extracción, específicamente para la operación *shotcrete*. Sin embargo, el proceso de abastecimiento de este insumo es deficiente, dado que las pérdidas generadas por *stand by* en la primera mitad del año 2019 ascendieron a S/. 119,000.00, esta penalidad es cobrada por la empresa transportista cuando los tractos que realizan el transporte del recurso se quedan parados y dejan de generar valor a la operación.

Esta tesis evalúa la factibilidad de implementar un *hub* logístico en la ruta hacia mina como parte de la cadena de suministro del cemento para reducir las pérdidas generadas por *stand by*, a través del análisis y la comparación de las simulaciones del escenario actual (sin *hub*) y el propuesto (con *hub*), tomando en consideración los tiempos de respuesta y riesgos asociados ante una solicitud. Adicionalmente, esta tesis propone recomendaciones asociadas a la implementación del *hub*.

### **PALABRAS CLAVE:**

Minería; Abastecimiento; Cemento; Cadena de suministro; *Stand by*; *Hub* logístico; Simulaciones.

## **ABSTRACT**

### **IMPROVEMENT OF THE BULK CEMENT SUPPLY PROCESS OF THE TAMBOMAYO MINING UNIT THROUGH AN ALTERNATIVE OPERATIONAL MODEL**

Buenaventura is one of the most important mining companies in the country. Among its mining units, one of the main ones is Tambomayo. For this underground mine, the cement is a critical and necessary supply for the exploration and extraction mining stage, specifically for the shotcrete operation. However, the supply process of this input is deficient, the losses generated by stand by in the first half of the year 2019 amounted to S/. 119,000.00, this penalty is charged by the transport company when the tracts that make the transport of the resource are stopped and stop generating value to the operation.

This thesis evaluates the feasibility of implementing a logistics hub on the route to the mine as part of the cement supply chain to reduce stand-by losses, through the analysis and comparison of simulations of the current scenario (without hub) and the proposed scenario (with hub), taking into consideration the response times and risks associated with a request. Additionally, this thesis proposes recommendations associated with the implementation of the hub.

#### **KEYWORDS:**

Mining; Supply; Cement; Supply chain; Stand by; Logistics hub; Simulations.

# INTRODUCCIÓN

La minería “es la actividad por la cual se cava en la tierra con el fin de extraer los metales o minerales que en ella existen siendo ayudados por maquinaria pesada y por mano de obra humana” [1]. En el Perú esta actividad económica aportó en el 2019, según el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, en promedio el 14% del Producto Bruto Interno nacional [2].

Buenaventura es una de las principales empresas mineras formales del país y cuenta con casi 70 años de experiencia en el rubro minero. En la actualidad, esta contiene 19 Unidades Mineras (UM) en desarrollo, producción y en proyectos. Actualmente, las principales unidades productivas de Buenaventura son: Orcopampa (Arequipa), Tambomayo (Arequipa), la Zanja (Cajamarca), Coimolache (Cajamarca) y Río Seco (Lima).

La Unidad Minera (UM) Tambomayo está ubicada a 4800 msnm en el distrito de Tapay, en la provincia Caylloma, en Arequipa. Las condiciones presentadas en Tambomayo dificultan el acceso de infraestructura, el uso de equipos especializados, la distribución de combustibles, insumos y el acondicionamiento físico del personal que labora en la mina [3].

La operación en Tambomayo es a socavón (subterránea), en vetas de oro y plata, y la capacidad de tratamiento de esta mina es de 2000 toneladas métricas diarias (TMD) [4]. Para que se pueda realizar la extracción y producción de los concentrados, uno de los materiales críticos y necesarios es el cemento. Este es utilizado para el proceso de chocreteado (*shootcrete*) de las paredes del socavón, necesarias para la operación minera subterránea. Hoy en día, y desde el 2018, el transporte de cemento está tercerizado con la empresa FC Transportes y Soluciones Especiales S.A.C. y se realiza en bombonas con capacidad de cargar hasta 30 toneladas.

La cadena de suministro del abastecimiento de cemento inicia en el requerimiento que realiza el área de logística de Buenaventura a la empresa proveedora de transporte (FC Transportes). Este requerimiento está basado en la solicitud emitida por las áreas de mina (almacén, geomecánica, entre otras), las cuales generan una guía para el transportista. Las unidades de transporte están conformadas por un tracto y una bombona; estas salen del almacén de FC Transportes y se dirigen a la planta de Yura, ubicada en las afueras de la ciudad de Arequipa, donde se disponen a cargar el tonelaje requerido. Luego parten con dirección a Tambomayo, ruta de aproximadamente 280 km a donde llegan luego de entre uno y dos días (*lead time* promedio).

El tramo de Yura hasta el desvío de Chivay a Cusco (los 100 km iniciales aproximadamente) se encuentran asfaltados. La distancia restante es trocha precipitada deteriorada, debido a que el paso de unidades y la climatología presente en las alturas de la sierra han generado que algunos tramos de ruta presenten lodo, huecos, nieve, inundaciones por río, rocas, desvíos a precipicios, desvíos por huaycos, entre otras complicaciones.

Las unidades llegan a Tambomayo y deben esperar una cola de camiones que, por prioridad de acuerdo al tipo de insumo, pasan por garita para la verificación en ingreso a la mina. Una vez dentro de la mina, las unidades deben esperar en la cola para descargar el insumo que llevan; en este caso, la cola para descargar cemento. El proceso de descarga se realiza en un silo con capacidad de 70 toneladas. Muchas veces ocurre que el silo está lleno y durante varias horas no libera su capacidad, entonces el camión que se encuentre adelante en la fila debe seguir esperando para poder descargar su contenido y retirarse.

Esta espera frecuentemente se extiende a días, generando una penalidad llamada *stand by*, que la empresa transportista cobra por tener sus unidades paradas. En este caso, la empresa transportista da a Buenaventura un plazo de dos días para realizar la descarga, caso contrario al tercer día se procede a cobrar 500 soles de *stand by* por cada día que la unidad siga en cola, hasta que reciba la autorización para salir de la mina y empezar el viaje de retorno al almacén de FC Transportes en Arequipa.

## **Justificación del problema**

La empresa Buenaventura cuenta con diferentes cadenas de suministros para los insumos requeridos (cal, cemento, peróxido, cianuro, petróleo, entre otros) en cada una de sus unidades mineras. Para que el suministro de estos insumos funcione, existe una planificación entre la unidad minera y las áreas de Logística, Almacén y Planeamiento de Geomecánica de la empresa Buenaventura. Frecuentemente, en esta planificación ocurren errores importantes como el requerimiento de una cantidad incorrecta de unidades: cada mes, hay por lo menos 5 unidades que son descargadas más de dos días después de llegar a la mina (cobran *stand by*) dado que se realizan los requerimientos por cantidades mayores que las necesarias. Otro desencadenante de errores es la descoordinación entre las partes involucradas, pues ocurre que cada semana se solicita un mínimo de dos unidades adicionales como *backup* de emergencia. Adicionalmente a los inconvenientes que ya existen en la ruta hacia la mina y los problemas sociales existentes en las zonas aledañas, estas solicitudes son peligrosas dado que el transporte en estos casos se realiza sin que los choferes tengan el descanso necesario.

Además, la mina carece de un espacio de maniobras adecuado para las unidades que llegan a abastecer de cemento, lo mismo ocurre en las otras cadenas de diferentes *supplies*. Esto, adicionado a la descoordinación mencionada, genera congestión vehicular en la mina; y así el aumento de los costos y riesgos debidos al pernocte de las unidades y sus choferes dentro de mina, lo cual requiere de una logística adicional.

Las complicaciones en la ruta pueden desencadenar en incidentes o accidentes que afectarían a las empresas involucradas en la cadena de suministro causando además posibles repercusiones en el medio ambiente y las comunidades. El personal de la empresa transportista está capacitado para cumplir las labores de chofer y de operario sobre la unidad que cada uno tiene asignada, y no para ejercer funciones que derivan del hecho de permanecer en la mina. En consecuencia, existe un peligro potencial para el personal que se queda en la mina, como puede ser el traslado de garita a almacén o el de transitar en la mina. Los riesgos de accidentes, fallas y demoras aumentan por tener las unidades mucho tiempo dentro de mina sin descargar, detenidas en el espacio donde se realizan las



maniobras y ocupando espacio que debería ser utilizado para los movimientos de las unidades.

## **Objetivos**

El objetivo principal de la presente tesis es evaluar el impacto económico que la implementación de un *hub* logístico podría tener en la cadena de suministro del cemento en la mina Tambomayo mediante la reducción de las penalidades generadas por *stand by*.

Además, se definieron los siguientes objetivos específicos para el desarrollo de la tesis:

- Seleccionar los criterios a considerar para evaluar la factibilidad del *hub* a través de un análisis exhaustivo en colaboración con los *stakeholders* del proceso.
- Determinar la ubicación más adecuada para el *hub* a través de un análisis multicriterio.
- Evaluar el impacto que la implementación del *hub* tendría con respecto a los criterios definidos, a través de dos la simulación de dos escenarios de la cadena de suministro del abastecimiento del cemento a la mina Tambomayo (con la operación actual y con la implementación del *hub* logístico).
- Establecer las políticas de funcionamiento que deberán ser aplicadas en la implementación del *hub* logístico para garantizar la sostenibilidad de los cambios sugeridos en el tiempo.
- Recomendar acciones adicionales a tomar en conjunto con la implementación del *hub* para asegurar el mejor aprovechamiento de los recursos.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentará un resumen de aquellos aspectos de la literatura que son relevantes para el desarrollo de este trabajo. Se comenzará por definir qué es un *hub* logístico, cómo se clasifican los *hubs* logísticos, qué características suelen tener, cuáles son las funciones que cumplen y cuáles son los criterios que deben tomarse en cuenta para su correcta implementación. Seguidamente, se presentará un resumen de los principales métodos de decisión multicriterio disponibles con miras a escoger el más adecuado para seleccionar la ubicación del *hub* logístico, cuya implementación se está evaluando. Luego, se explicarán los pasos que deben seguirse al hacer una simulación, desde el entendimiento del sistema en estudio, la formulación de las preguntas a responder, la recolección de los datos asociados a las variables de interés, la selección de los modelos, la estimación y validación de los parámetros, y la selección de los indicadores a monitorear en relación a las preguntas que se buscan responder.

### 1.1. Implementación de un *hub* logístico

Dependiendo de la operación, un *hub* logístico puede ser implementado en diferentes cadenas de suministros en distintos sectores. A continuación se explicarán algunos conceptos importantes relacionados a la implementación de un *hub* logístico.

#### 1.1.1. Definición de *hub* logístico

Un *hub* logístico es definido como un área en la que “se realizan actividades relativas al transporte, logística y distribución de mercaderías o *commodities* por diferentes agentes dentro de una cadena de suministro” [5]. La finalidad de un *hub* logístico es reunir y organizar las cargas que llegan de diferentes destinos para su posterior redistribución de manera efectiva. El *layout* de un *hub* logístico debe contar con una correcta distribución de áreas, que pueden ser conformadas por: [6]

- Almacenes (pueden estar automatizados)
- Centros de distribución (pueden estar automatizados)
- Zonas para *crossdocking*, clasificación y *packaging*.
- Muelles de carga y descarga
- Instalaciones administrativas

Algunas de las ventajas que un *hub* logístico puede brindar dentro de una cadena de suministro son: [6]

- Viabilidad para realizar nuevos proyectos de manera sostenible.
- Generación de empleo asociado a las operaciones logísticas.
- Generación entornos de negocios de bajo riesgo y acuerdos de libre circulación de mercancías.
- Reducción de los riesgos ya existentes asociados a la ruta y la pernoctación de unidades en mina.
- Ahorro de costos de *stand by*.
- Eficiencia en las horas hombre trabajadas (FTE).

### **1.1.2. Clasificación y estructura de un *hub* logístico**

Dependiendo de la complejidad de la cadena de suministro existen distintas clasificaciones para un *hub* logístico, tales como: (1) centro de distribución centralizado, (2) plataforma logística multimodal y (3) zona logística. [7]

Un centro de distribución centralizado es aquel que busca mejorar la cobertura de las mercancías o *commodities* ingresados. Su función principal es recopilar las unidades o lotes y distribuirlas según lo requerido con una estrategia específica (ejemplo: estrategia FIFO), controlando el inventario. Por otro lado, una plataforma logística multimodal es un *hub* logístico en el que intervienen distintos tipos de transporte y la importancia de la mercancía recae en el producto por su valor, dejando en segundo plano la manera en la que es distribuido. Por lo general, esta clasificación de *hub* funciona en los puertos y busca aumentar los ingresos económicos a través de las rutas internacionales [8]. Finalmente, una zona logística funciona con carga aérea y portuaria, y cuenta con más de un tipo de

transporte, lo que permite establecer planes de ejecución más complejos para la distribución.

Los *hubs* logísticos se dividen en dos tipos según la cantidad de modos de transporte involucrados. El primer tipo abarca solo un modo de transporte y se desempeña principalmente en el transporte terrestre, distribuyendo las mercaderías o *commodities* en unidades terrestres. El segundo tipo abarca más de un modo de transporte (multicanales), y debe contar con el equipo adecuado para manipular la mercadería y con puntos de acopio según especificaciones.

En la cadena de suministro de una mina se pueden encontrar almacenes, áreas de almacenamiento, espacios de clasificación de carga y centros de distribución, etc. En esta tesis se propone utilizar un *hub* logístico de tipo unimodal terrestre como centro de distribución centralizado para la mina Tambomayo.

### **1.1.3. Objetivos de un *hub* logístico en la cadena de suministro de una mina**

Un *hub* logístico en la cadena de suministro de una mina tiene como principal objetivo cumplir una logística determinada para lograr la correcta distribución y abastecimiento de unidades cargadas para la mina, y brindar además un beneficio económico que sea sostenible; es decir, su funcionamiento debería reducir los costos de transporte y operaciones derivadas. Entre los objetivos secundarios de un *hub* logístico, algunos son: (1) la planificación de entrada y salida de unidades para limitar los riesgos generados por la circulación de unidades en ruta y dentro de la mina, y (2) la reducción de tiempos en la respuesta a cualquier imprevisto como: solicitudes urgentes de unidades, incidentes y accidentes ocurridos en la ruta hacia la mina.

En otras palabras, el propósito del *hub* logístico es optimizar la cadena de suministro, facilitar la organización del trabajo, sincronizar las partes (almacén, planeamiento geomecánico, área logística y proveedores) y utilizar de manera eficiente los recursos disponibles, y de esta manera, alcanzar los parámetros de eficiencia que se traducen en la continuidad de las operaciones de la mina, garantizando el control de las operaciones de la cadena de suministro.

#### **1.1.4. Características y funciones de un *hub* logístico como centro de distribución centralizado**

Un *hub* logístico como centro de distribución centralizado posee una infraestructura industrial para el paso y retención de unidades, instalaciones con área de maniobras que permitan un adecuado desempeño de las operaciones, capacidad para conectarse con distintos puntos de llegada, poblaciones aledañas y otros *hubs*. Además, para la correcta ejecución de sus funciones, debe contar con información actualizada y certera, y un adecuado sistema de comunicaciones que funcione en conexión con las partes involucradas (choferes, centro de control en el *hub*), mediante radios, GPS, entre otros.

De acuerdo a estas características y a la cadena de suministros de la mina Tambomayo, el *hub* logístico propuesto debe cumplir responsabilidades y funciones para la viabilidad y futura proyección del *hub* y la mina. Las funciones principales del *hub* serían las siguientes:

- Programar el envío de unidades de cemento para abastecer a la mina, previa coordinación con las áreas responsables de la mina y las áreas administrativas de la empresa Buenaventura.
- Gestionar y controlar los requerimientos emitidos por la mina según la demanda real de los insumos, además de las entradas y salidas de unidades al *hub*, manteniendo el área de descarga descongestionada.
- Supervisar la carga de las unidades previamente a su llegada a mina, lo cual implica asegurar que cada unidad cuente con los precintos correctamente cerrados y los equipamientos de emergencia correspondientes, y que los choferes se encuentren en adecuadas condiciones para el traslado a mina.
- Asegurar una respuesta inmediata ante cualquier accidente que ocurra en la ruta hacia mina, utilizando como apoyo un container de emergencia equipado para atender todo tipo de accidentes.
- Coordinar la llegada y salida de unidades, informando las condiciones de la ruta y sus complicaciones.

- Revisar los documentos de las unidades e informar a la mina en caso exista cualquier eventualidad.

## **1.2. Variabilidad en la demanda de suministros en una mina**

Una de las razones por las cuales se realizan solicitudes innecesarias de unidades es la variabilidad de la demanda de los insumos. Esto ocurre sobretodo en el consumo de cemento, pues como ya fue mencionado, es usado en el chocreteado (*shootcrete*). Esta operación es realizada en las etapas de exploración y explotación, y el progreso de la misma es impredecible dado que depende de las condiciones de la tierra que se van descubriendo en el proceso, por lo que se vuelve complicado pronosticar el consumo de los insumos utilizados. Además, la mina Tambomayo se encuentra en una zona alta de la sierra (4800 m.s.n.m) y su climatología presenta truenos, tormentas, friajes y heladas, por lo que en ocasiones la mina entra en “alerta roja”. La “alerta roja” prohíbe la continuidad de las operaciones en la mina en momentos en que los riesgos de accidentes son altos; por ejemplo, durante una tormenta. De hecho, esta es una de las principales causas de parada de producción en la mina Tambomayo. Detener la producción por alerta roja significa también un cambio en la demanda de insumos que no puede ser anticipado, generando complicaciones en la cadena de suministro como cambios de último minuto, largas colas de espera para descargar los suministros y aumento de los costos de *stand by*.

## **1.3. Toma de decisiones bajo incertidumbre**

Diariamente las empresas enfrentan situaciones de toma de decisiones en las que un recurso muy importante es la información que poseen. “La gestión de la incertidumbre es un desafío principal dentro de la gestión de la cadena de suministro. Por lo tanto, se espera que los métodos de planificación de la cadena de suministro que no incluyen la incertidumbre obtengan resultados inferiores si se comparan con los modelos que lo formalizan implícitamente” [9]. Dado que las decisiones están condicionadas al desconocimiento de lo que pueda suceder o del impacto de variables que no pueden ser controladas, la calidad de la decisión no depende de los resultados. Es posible entonces haber tomado correctamente una decisión, aprovechando todos los recursos e información

disponibles, y que el resultado no sea favorable, producto de situaciones que no se pueden predecir con certeza.

Una manera de llamar a las variables que no se pueden controlar, puede ser “variables contextuales”, en donde la incertidumbre está presente al tomar una decisión sobre varias opciones. “En muchas decisiones, las consecuencias de los cursos de acción alternativos no pueden predecirse con certeza. Una compañía que está considerando el lanzamiento de un nuevo producto no estará segura de cuán exitoso será el producto, mientras que un inversionista en el mercado de valores generalmente no estará seguro de los retornos que se generarán si se elige una inversión en particular” [10]. En este último caso, el inversionista deberá tomar una decisión sobre varias opciones de inversión, esperando elegir la que le traiga mayor retorno pero sin tener total certeza de ello. Este escenario es ciertamente comparable con la selección de la ubicación que debería tomar el *hub* logístico. Si bien hay diferentes opciones a elegir, para tomar una decisión que cumpla de la mejor manera los criterios definidos en base a la ubicación del *hub*, es necesario realizar un análisis de decisión multicriterio.

### **1.3.1. Análisis de decisión multicriterio (MCDA)**

“El MCDA es la actividad de la persona que, mediante el uso de un modelo explícito pero no necesariamente completamente formalizado, ayuda a obtener elementos de respuestas a las preguntas planteadas por una parte interesada en una decisión y, por lo general, a recomendar o simplemente favorecer un comportamiento que aumentará la consistencia entre la evolución del proceso, los objetivos y el sistema de valores interesado” [11].

MCDA tiene como objetivo establecer, sobre bases científicas reconocidas, con referencia a hipótesis de trabajo, formulaciones de proposiciones que luego son sometidas al juicio de un tomador de decisiones y/o los diversos actores involucrados en el proceso de toma de decisiones.

MCDA puede ser utilizado para [12]:

- Analizar el contexto de toma de decisiones mediante la identificación de los actores, las diversas posibilidades de acción, sus consecuencias y lo que se arriesga al tomar una decisión u otra.
- Elaborar recomendaciones utilizando resultados tomados de modelos y procedimientos computacionales dentro del marco de una hipótesis de trabajo.
- Identificar las variables del proceso que serán analizadas para dar legitimidad a la decisión tomada.

El proceso de toma de decisiones multicriterio comienza con la determinación de un problema a resolver, el cual precisa optimizar una función objetivo a través de la toma de diferentes decisiones. Luego se definen el problema general y los específicos. Los siguientes pasos son: el modelado del sistema, el análisis/evaluación del sistema y la implementación/simulación según las decisiones tomadas. Parametrizando el proceso se puede afirmar que existen cinco fases a cumplir [13]:

- (1) Fase inicial: El decisor y/o analista reconoce que existe un problema y que es necesario resolverlo para mejorar el caso de estudio.
- (2) Problemática: Luego de analizar el problema detenidamente se definen el problema general y los específicos, y también los criterios a considerar.
- (3) Modelar el sistema: Se procede a establecer “las relaciones lógicas entre los distintos elementos del sistema para el método de análisis elegido. Es aquí donde por ejemplo se produce la normalización entre las distintas magnitudes que aparecen en los atributos”. [13]
- (4) Evaluación y análisis: Una vez definidos los criterios que se deben considerar, se continúa con el análisis de ventajas y desventajas de las alternativas que se tienen y sean convenientes para el decisor.
- (5) Implementación: Después de tomar diferentes decisiones según los criterios evaluados, se procede a verificar que los resultados sean positivos y alentadores para el problema definido anteriormente.



### 1.3.2. Métodos de evaluación multicriterio

Los métodos de evaluación multicriterio ayudan a realizar el análisis de alguna situación en la que se debe tomar una decisión sobre varias opciones. Algunos de los principales son: [14]

- Métodos de lista de control:

Suelen comparar un conjunto de opciones en relación con un conjunto de factores de decisión, en forma de matriz. Estos factores suelen ser económicos, técnicos, sociales y medioambientales. Se obtiene una puntuación global para cada opción transformando los criterios individuales en números. Para completar la matriz de compensación se pueden utilizar los enfoques cuantitativos o cualitativos de clasificación, ranking o escala, de ponderación y de ponderación de escalas. Esto se conoce como análisis de compensaciones, se aplica especialmente cuando la decisión implica una compleja variedad de criterios de evaluación para cada opción, y generalmente una alta proporción de estos criterios están relacionados con el medio ambiente. [14]

- Métodos de utilidad multiatributo (MAUT):

Evalúan y comparan posibles consecuencias considerando sus probabilidades de ocurrencia. Se desarrollan ideas y principios de utilidad, tanto para los casos en que sólo hay un tipo de consecuencia como en los que hay varios tipos de consecuencias. El objetivo es desarrollar herramientas que ayuden a tomar decisiones que correspondan con las preferencias de las personas, tanto a nivel individual como grupal. Se utilizan generalmente al estudiar las mejores opciones para proyectos a gran escala, especialmente los relacionados con el desarrollo de infraestructuras. [14]

- Proceso de jerarquía analítica (AHP):

Se utiliza para comprender problemas complejos a través de una estructura jerárquica. Se define la naturaleza de las jerarquías dentro del problema, y las prioridades entre cada jerarquía, buscando relaciones entre ellas mediante un juicio

informado. De esta manera, reduce un problema de decisión a una serie de análisis autónomos más pequeños. Se realiza un análisis de preferencias para la toma de decisión, para determinar la importancia relativa de cada criterio. Esta importancia es considerada en el análisis por pares de todas las combinaciones de opciones posibles de proyecto, y así se determina el valor para cada una de las opciones. [14]

El resultado final es una clasificación de todas las opciones en una escala de intervalos que permite seleccionar la óptima. De esta manera, el AHP desarrolla una teoría y proporciona una metodología para modelar problemas de decisión en las ciencias económicas, sociales y de la ingeniería. [14]

- Análisis de concordancia:

El análisis de concordancia es un modelo de toma de decisiones multicriterio (MCDM) no compensatorio. Se compara las opciones, por pares, con respecto a cada criterio y se establece el grado de predominio de una opción sobre otra. El grado de dominancia se obtiene a través de funciones matemáticas, que determinan hasta qué punto los resultados de cada opción y sus ponderaciones confirman o contradicen las relaciones de dominancia entre las otras opciones. Esto se maneja en dos etapas:

En la primera etapa se definen los criterios, los cuales se basan en el principio de que estos son legítimos y se busca la mayor severidad posible. A continuación se determina una puntuación de utilidad para cada opción, según estos criterios definidos. Esta definición de criterios y puntuación de utilidad se pueden llevar a cabo mediante un análisis realizado en colaboración con los principales *stakeholders* del proceso. En la segunda etapa se define el conjunto de concordancia y discordancia, de esta manera se examina tanto el grado en el que las ponderaciones de las preferencias y las relaciones de dominancia por pares coinciden como en el que difieren. El resultado del proceso es la selección de una opción óptima o un grupo de opciones preferidas. [14]

A continuación, la Tabla 1 resume los principales métodos de evaluación multicriterio y sus características:

Características	Lista de control	MAUT	AHP	MCDM
Tipo de problema a atacar.	Compleja variedad de criterios	Decisiones sobre preferencia de las personas	Estructura jerárquica compleja	Predominio entre criterios
Resultado	Puntuación global para cada opción transformando los criterios individuales en números	Comparan posibles consecuencias considerando sus probabilidades de ocurrencia	Clasificación de las opciones, selección óptima	Opción óptima
Visibilidad numérica	Clasificación, ranking, ponderación, ponderación de escalas	Comparación de consecuencias según probabilidad de ocurrencia	Escala de intervalos	Comparación en pares

Tabla 1. Características de los métodos de evaluación multicriterio. Elaboración propia.

Según el problema que afronta esta tesis y lo evaluado en la Tabla 1, se puede deducir que el análisis de concordancia (MCDM) es la herramienta mejor alineada para la elección de la ubicación del *hub*. Dentro del análisis de concordancia, uno de los métodos más utilizados es el método Electre, que consiste en analizar la relación entre todos los emparejamientos posibles de las diferentes opciones, utilizando criterios comunes y verdaderos para evaluar cada opción. Electre es un método de clasificación (*outranking*), pues el resultado es una medida de lo que se denomina el "rango superior" de una opción *a* sobre otra *b*, debiendo *a* ser al menos tan buena como *b*. [14] Para los métodos *outranking*, la relación de preferencia:

- No ordena las alternativas, solo obtiene relaciones de preferencia entre ellas.

- Acepta la superación de una alternativa  $a$  sobre una alternativa  $b$  cuando la opción  $a$  obtiene mayor puntuación que la opción  $b$  en absolutamente todos los criterios.
- No tiene que ser completa.
- No tiene que ser transitiva.

Los métodos de *outranking* se utilizan cuando:

- Al menos un criterio no es cuantitativo.
- Las unidades de evaluación de los criterios son heterogéneas y difícilmente se pueden estandarizar.
- La compensación entre criterios no se puede justificar.
- Se necesita tomar en cuenta umbrales de preferencia o la posibilidad de rechazar la selección de una alternativa sobre otra, cuando uno de los criterios no es satisfecho.

### **1.3.3. Método Electre**

El método Electre asigna, a cada opción, una puntuación de acuerdo a un conjunto de criterios, y realiza el análisis por pares de las diferentes opciones. Esta metodología implica generar índices de concordancia y discordancia, considerando el grado de importancia relativa de cada criterio. El resultado es una medida del grado en que cada opción supera a las demás. [14]

Existen seis versiones principales de ELECTRE: I, II, III, IV, Tri e IS. La versión empleada para cada situación depende de los tipos de criterios a considerar, que pueden ser: criterios verdaderos y pseudocriterios. [14]

#### Criterios verdaderos y pseudocriterios

Los criterios verdaderos se utilizan dentro de lo que se denomina una estructura de preferencia "tradicional" en la que no existen umbrales o límites, y se utilizan las diferencias entre las puntuaciones de los criterios para tomar la decisión. Los pseudocriterios, por otro lado, implican un enfoque de umbral de dos niveles: en primer lugar, un umbral de irrelevancia por debajo del cual el decisor muestra una clara

indiferencia sobre las opciones, y, en segundo lugar, un umbral de preferencia por encima del cual el decisor está seguro de tener una preferencia estricta. Existe una zona intermedia dentro de la cual hay situaciones en las que se aplica una "preferencia débil" por una opción sobre otra, y la información del decisor puede ser contradictoria o indeterminada. [14]

#### Diferencias entre los métodos Electre

Existen diferentes métodos Electre para tomar una decisión sobre varias alternativas. El uso de cada método Electre se determinará de acuerdo a la situación, pues cada método Electre tiene una utilidad específica. Además, se debe determinar si los criterios son verdaderos o pseudocriterios. A continuación se muestra la utilidad de los métodos Electre:

- Electre I y Electre IS: Elección de una o varias alternativas de un conjunto de alternativas.
- Electre TRI: Determinar las alternativas aceptables
- Electre II, Electre III y Electre IV: Ordenar las alternativas en orden de preferencia.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de las características de cada método Electre. En color verde se presentan las características que identifican la situación de toma de decisión a trabajar, mientras que en color rojo se presentan las características que no están relacionadas a la misma. Esto ayuda a responder la pregunta: ¿Qué método utilizar?

Características	Electre I	Electre II	Electre III	Electre IV	Electre IS	Electre Tri
Para seleccionar alternativas	X				X	
Para determinar alternativas aceptables						X
Para ordenar alternativas		X	X	X		
Utiliza criterios verdaderos	X	X				
Utiliza pseudocriterios			X	X	X	X

Tabla 2. Características de los diferentes métodos Electre [14]

Entonces, según se muestra en la Tabla 2, el método más adecuado a utilizar en la presente tesis es Electre I.

### Electre I

El método de *outranking Electre I* se basa en la relación de criterios según un rango de superación por pesos de relevancia. Lo que se busca es reducir el tamaño o número de alternativas de decisión y a su vez eliminar los diferentes criterios de decisión que son dominados por otros, para así suprimir los que no cuentan con una relevancia mayor al resto de criterios. Es así que los decisores que implementarían la opción escogida (*stakeholders*), seleccionan los criterios relevantes para el uso del método. Luego, se define la “importancia” de los criterios para luego comparar cuantitativamente cuál la relevancia de los mismos para el modelo a seguir [15]. A continuación, en la Figura 1 se muestra el diagrama de funcionamiento para el uso del método Electre I.

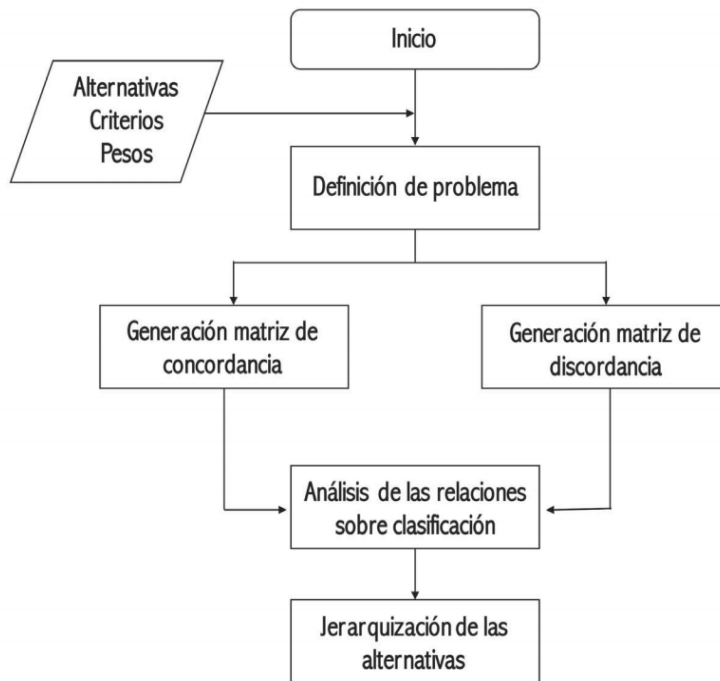


Figura 1. Diagrama de flujo del funcionamiento del método Electre [15]

El objetivo del método Electre I es obtener un subconjunto  $N$  de opciones de decisión que superen todas las otras opciones. Este método se desarrolla en dos etapas [14]:

Etapa 1: Construcción de la relación de *outranking*

Se definen criterios de evaluación ( $j = 1, \dots, n$ ), y se asigna a cada uno un peso  $W_j$ . Para cada par  $(a, b)$  de alternativas, se calcula un índice de concordancia [14]:

$$C(a, b) = \frac{1}{W} \sum_{\forall j: g_j(a) \geq g_j(b)} w_j \quad (1)$$

Donde:

$$W = \sum_{j=1}^n w_j \quad (2)$$

y donde  $g_j$  representa el puntaje de una alternativa bajo el criterio  $j$ .

El índice de concordancia indica qué tanto una opción supera a otra, resultando en un valor entre 0 y 1. Sin embargo, esta superación se puede contradecir por un índice de discordancia  $D(a, b)$ , que aumenta a medida que la preferencia hacia la segunda opción aumenta, al menos para un criterio. El índice de discordancia  $D(a, b)$  es igual a 0 cuando para todos los criterios el puntaje de la alternativa  $a$  supera el puntaje de la alternativa  $b$ . En caso contrario, se anula cualquier superación contraria que pudiera ser indicada por el índice de concordancia. El índice de discordancia se define de la siguiente manera [14]:

$$D(a, b) = 0 \quad \text{si} \quad g_j(a) \geq g_j(b) \quad \forall j \quad (3)$$

En caso contrario,

$$D(a, b) = \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)] \quad (4)$$

$$\delta = \max_{c,d,j} [g_j(c) - g_j(d)] \quad (5)$$

Donde:

$\delta$  es la diferencia máxima de los puntajes  $g_j$  en cualquier criterio

Utilizando un rango  $\delta_j$  para la escala de cada criterio  $j$ , podemos reescribir el índice de discordancia como [14]:

$$D(a, b) = \max_j \left[ \frac{g_j(b) - g_j(a)}{\delta_j} \right] \quad (6)$$

Donde:

$\delta_j$  es el rango de la escala asociada al criterio  $j$ .

Electre I define la relación de superación comparando los índices de concordancia y discordancia según límites definidos. Supongamos que  $c$  y  $d$  son los umbrales definidos para los índices de concordancia y discordancia, respectivamente. Electre I establece que una alternativa  $a$  supera una alternativa  $b$  si y solo si el índice de concordancia  $C(a,b)$  es mayor que el umbral  $c$ , y el índice de discordancia  $D(a,b)$  es menor que el umbral  $d$ . [14]

#### Etapas 2: Explotación de la clasificación

Electre I busca todas las opciones en dos subconjuntos  $M$  y  $N$  tales que cada opción de  $M$  sea superada por al menos una opción de  $N$ , y las opciones en  $N$  sean incomparables con la relación de superación definida. El número de opciones en  $N$  disminuye a medida que el valor del límite de concordancia se reduce y el de discordancia se incrementa. [14]



#### 1.4. Simulación de escenarios

En la búsqueda de conocer los posibles resultados en los diferentes posibles escenarios para la toma de una decisión, el ser humano ha desarrollado la simulación. Esta es definida como “la imitación de la operación de un proceso o sistema del mundo real” [16] o “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con el modelo con el fin de comprender el comportamiento del sistema y evaluación de diversas estrategias para el funcionamiento de los sistemas.” [16] En otras palabras, la simulación es una manera de reproducir los escenarios sin la necesidad de aplicarlos en la vida real, de manera que se obtienen resultados mientras se ahorra el tiempo, el dinero y los recursos que serían utilizados en la implementación.

Una simulación discreta suele simular procesos estocásticos; es decir, eventos que ocurren aleatoriamente en la línea de tiempo. Un modelo de simulación general se comprende de  $n$  variables de entrada ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) y  $m$  variables de salida ( $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ ) o ( $y_1, y_2, \dots, y_m$ ). (Ver Figura 2) [10]

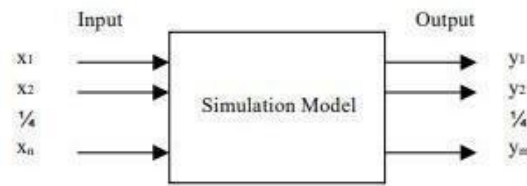


Figura 2. Modelos de simulación [17]

Además, los procesos simulados pueden ser optimizados para obtener mejores resultados según criterios determinados. Existen diferentes modelos para la optimización de una simulación (ver Figura 3), uno de ellos es la comparación múltiple. Este implica la alteración de los valores de las variables de entrada en los distintos escenarios utilizando como retroalimentación los valores de las variables de salida. Esta iteración fue realizada manualmente en la construcción del modelo, hasta conseguir los inputs con mejores resultados en la cadena.

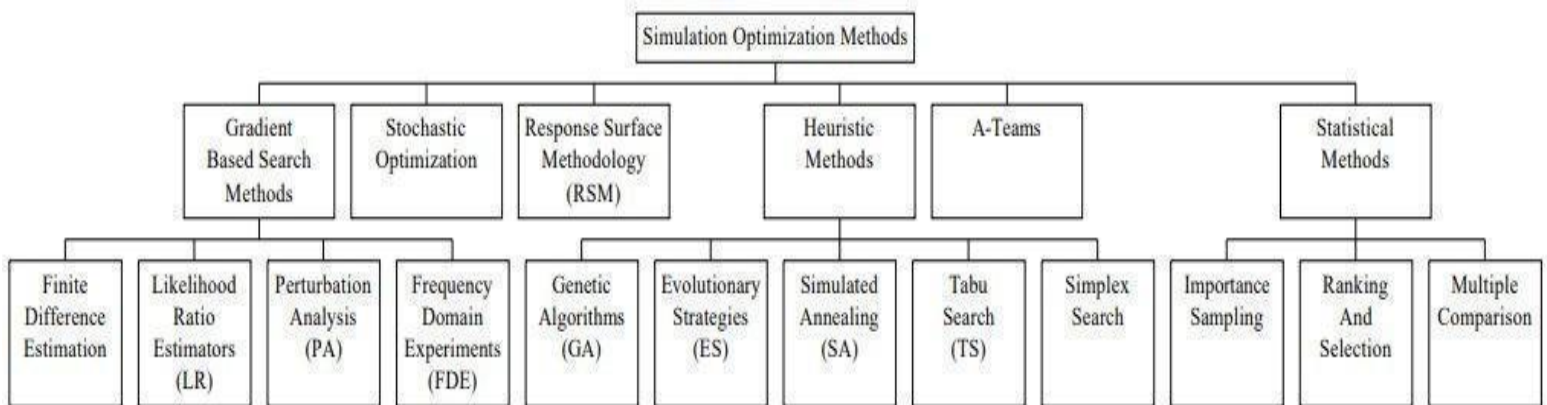


Figura 3. Métodos en modelos de optimización de simulación [16]

#### 1.4.1. Herramientas de simulación

Es posible realizar una simulación siguiendo los siguientes pasos: (1) Observar el proceso, (2) Identificar metas-métricas, (3) Identificar posibles variables de decisión, (4) Identificar y diseñar la lógica del proceso, (5) Recolectar tiempos y valores de entrada, (6) Inferir distribuciones de probabilidad, (7) Simular, (8) Validar, (9) Reportar métricas obtenidas, (10) Correr más escenarios (y recomendar decisiones) [18].

Para desarrollar estos 10 pasos, se puede utilizar diferentes herramientas que varían desde metodologías hasta el uso de algún software que facilite el cálculo de los indicadores o el diseño y construcción de la estructura de la simulación. Un lenguaje de programación útil para la simulación de escenarios es el software Python, el cual será utilizado en la presente tesis.

#### Lenguaje de programación Python

Python es un lenguaje de programación interpretado orientado a objetos, procesos, modelos, entre otros, todos semánticos de alto nivel. La estructura de datos integrados con tipo y enlaces dinámicos hacen que sus aplicaciones puedan adaptar situaciones reales a un modelo digital mediante simulaciones que contengan variables con datos reales. De esta manera, se puede trabajar con la combinación de paquetes, librerías y otras herramientas de Python que permiten crear la estructura del modelo de simulación. El *user guide* de Python indica que la combinación de paquetes “permite llevar el poder del modelado y la

simulación a distintos tipos de negocios.” [19] Los paquetes utilizados en la simulación son: Simpy, Numpy, Itertools, Random, Pandas, Math, entre otros.

Los posibles escenarios simulados en Python incluyen:

- Análisis de diferentes cadenas de suministro que abarcan actividades como almacenamiento, transporte y sistemas logísticos.
- Análisis a detallado de cualquier tipo de sistema de fabricación, incluida la manipulación de materiales y componentes.
- Análisis de servicios complejos al cliente y sistemas de gestión de clientes.
- Análisis predictivo de la eficiencia y rendimiento del sistema con base en indicadores claves o KPI's como: costos, tiempo de ciclo, tiempos en el proceso, etc.
- Identificación de los cuellos de botella del proceso, presentando indicadores de acumulación de colas y uso excesivo de recursos.

### **1.5. Conceptos básicos de minería**

Para entrar en contexto con la problemática que esta tesis pretende atacar, es necesario conocer sobre el funcionamiento de una mina en Perú. Para ello, se explicarán los fundamentos de la minería peruana, y con ellos la estratificación y las diferentes clasificaciones de la minería en el Perú.

#### **Fundamentos de la minería**

Según el Glosario Técnico Minero publicado por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia [20], la Minería involucra:

Ciencia, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales. Estrictamente hablando, el término se relaciona con los trabajos subterráneos encaminados al arranque y al tratamiento de una mena o la roca asociada. En la práctica, el término incluye las operaciones a cielo abierto, canteras, dragado aluvial y operaciones combinadas que incluyen el tratamiento y la transformación bajo tierra o en superficie. La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales a partir de la corteza terrestre [20].

En este sentido, el Perú es un país minero por excelencia, con “una tradición metalúrgica que se remonta a más de 10,000 años (...) con la extracción de minerales no metálicos como el cuarzo, riolita, toba, cuarcita y calcedonia, con la finalidad de elaborar instrumentos de caza, pesca y recolección” [21]. Sin embargo, actualmente este sector ha crecido y el portafolio de minerales se ha extendido; los principales productos de obtención ahora son Estaño, Molibdeno, Plomo, Oro, Zinc, Plata y Cobre. El Perú se encuentra en el top 5 mundial de producción de los últimos 3 minerales mencionados, tal como se muestra en la Tabla 3.

Roque Benavides, en su libro *La minería responsable y sus aportes al desarrollo del Perú*, menciona: “El Perú tiene un gran potencial en las zonas altoandinas, gracias al cual importantes empresas líderes desarrollan proyectos de envergadura. Nuestros minerales tienen gran demanda en mercados como USA, China, Suiza, Canadá, Japón, entre otros.” [22] Entonces, vale decir que el potencial minero del Perú compite mundialmente; tal como se muestra en el ranking de la Tabla 3, lo que posiciona al sector minero como uno de los más contribuyentes al desarrollo económico del país.

Perú en el Ranking de Producción Minera [23]		
Metal	Ranking en Latinoamérica	Ranking Mundial
Oro	1	6
Cobre	2	2
Plata	2	2
Zinc	1	2

Tabla 3. Perú en el Ranking de Producción Minera [23]

### **Estratificación de la minería**

En Perú, la actividad minera formal está estratificada en: Gran y Mediana Minería, Pequeña Minería y Minería Artesanal. Según la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), “estos estratos se definen de acuerdo a la escala de producción de las operaciones mineras (medida en términos de capacidad de producción o beneficio y extensión del área

explotada) y se encuentran regulados por dos tipos de régimen minero que establecen un conjunto de obligaciones, expresadas fundamentalmente en la producción anual mínima requerida y el pago de un derecho de vigencia” [24]. Las características de estos estratos se muestran en la Figura 4:



Figura 4. Estratificación de la Minería. Fuente: Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA) [24]. Elaboración propia

“Hasta diciembre del 2018, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) ha registrado un total de 12,224 titulares mineros, de los cuales referencialmente 1,532 pertenecen a la pequeña minería; 175 a la minería artesanal y 10,517 a la gran y mediana minería” [25]. Esto se observa en la Figura 5.

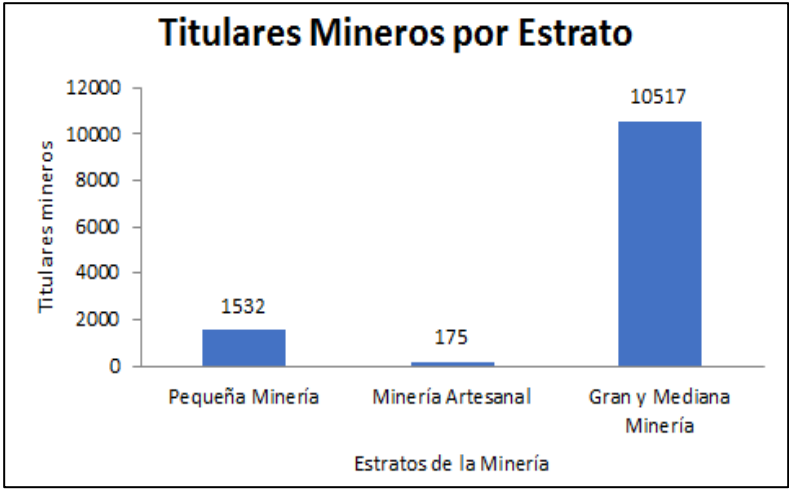


Figura 5. Titulares Mineros por Estrato (Elaboración propia). Datos obtenidos de MINEM [25]

## **Minería formal y no formal**

Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), la minería en el Perú se divide en formal y no formal [3]. Estos dos tipos de minería se diferencian principalmente por el cumplimiento de los requisitos y permisos necesarios para la actividad y por las zonas de operación.

### **Minería Formal**

La minería formal comprende los cuatro estratos mencionados anteriormente: Mediana y Gran Minería, Pequeña Minería y Minería Artesanal. Según el MINEM, esta clasificación de la minería “cumple con todos los requisitos y permisos mineros, ambientales, sociales, laborales, tributarios establecidos en nuestra normatividad legal vigente” [3]. Algunos de estos requisitos son: “concesión minera o contrato de cesión o explotación, permiso de uso del terreno superficial, estudio de impacto ambiental, licencia de uso de agua, licencia social, autorización de inicio o reinicio de operación minera”. [3]

### **Minería No Formal**

La minería no formal, por otro lado, se subdivide en informal e ilegal. La minería informal es aquella actividad minera que opera en zonas no prohibidas y a pequeña escala (PPM-PMA), pero los equipos y maquinarias utilizados no corresponden a las características de PPM o PMA. Además, no cumple “con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades”. Sin embargo, para ejercer esta actividad, es necesario haber empezado un proceso de formalización y contar con una declaración de compromiso.

Finalmente, la minería ilegal, según el MINEM, “es una actividad minera al margen de la Ley, que genera grandes utilidades sin ningún compromiso ni responsabilidad, depredando yacimientos, disturbando terrenos y causando graves daños ambientales en los recursos hídricos y en el sector agropecuario así como daños a la salud de las poblaciones y generando además serios conflictos sociales” [3].

La Figura 6 presenta la producción ilegal e informal de oro en el Perú, registrada y no registrada, durante el período 2003 – 2014:

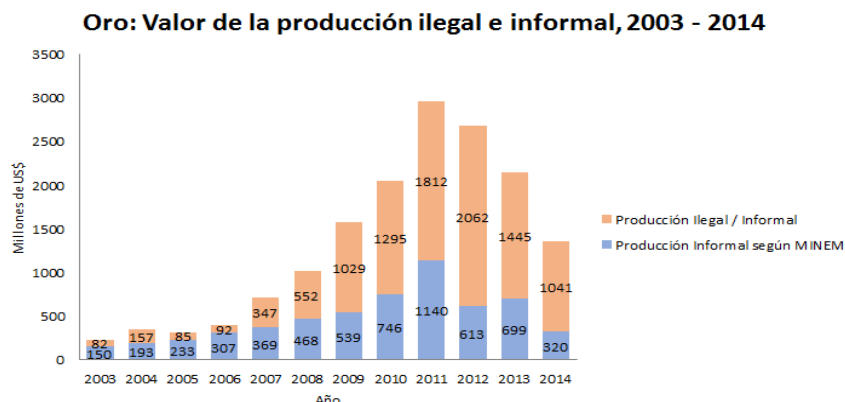


Figura 6. Producción de oro formal e informal en Perú. Elaboración propia. [26]

Este gráfico deja claro en primer lugar que, si bien la minería es una de las actividades que más aportan al PBI y su producción genera grandes cantidades de dinero, esta actividad también está produciendo grandes cantidades de dinero de manera informal/ilegal; y de eso, gran proporción no es registrada. Para dar un panorama de la proporción, a continuación la Tabla 4 presenta el ratio de minería no formal registrada/no registrada, tomando los datos presentados en el gráfico anterior.

Año	No registrada (millones de \$)	Registrada (millones de \$)	Ratio
2003	82	150	0.55
2004	157	193	0.81
2005	85	233	0.36
2006	92	307	0.30
2007	347	369	0.94
2008	552	468	1.12
2009	1029	539	1.91
2010	1295	746	1.74
2011	1812	1140	1.59
2012	2062	613	3.36
2013	1445	699	2.07
2014	1041	320	3.25

Tabla 4. Ratio de minería no formal registrada/no registrada. Elaboración propia (Basado en [26])

Como se observa, la producción de minería no formal registrada/no registrada está creciendo de manera exponencial, llegando la producción ilegal e informal no registrada a triplicar la producción registrada.

### **Minería superficial y subterránea**

Las unidades mineras en el país y el mundo también están clasificadas de acuerdo al método de explotación. Los dos principales son la minería a tajo abierto (superficial) y la minería a socavón (subterránea).

### **Minería superficial o a tajo abierto**

Según el MINEM [27], las minas a tajo abierto son “aquellas cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno, utilizando generalmente maquinarias de gran tamaño” como dragalinas, palas excavadoras, rotopalas, mototrallas, bulldozers, camiones, etc. Para esta actividad, es preciso diseñar el tajo y, mediante actividades topográficas, realizar el establecimiento de mallas perforadoras, actividades de perforación, carguío de explosivos y voladura. Posteriormente se carga y transporta el resto de minerales, que carecen de valor económico. El mineral extraído se transporta a zonas de almacenamiento para luego ser procesado en refinadoras o plantas de producción en donde se transforma en producto terminado.

Las minas a tajo abierto “son económicamente rentables cuando los yacimientos son diseminados y afloran o se encuentran cerca de la superficie”; de lo contrario, se vuelve conveniente cambiar de método de explotación a minería subterránea [27]. En la Figura 7 se observa cómo lucen dos minas superficiales:





(a)



(b)

Figura 7. Minería superficial. (a) Tintaya, mina superficial en Cusco. (b) Yanacocha, mina superficial en Cajamarca. [27]

### Minería subterránea o a socavón

Las minas subterráneas, por otro lado, son aquellas en las que, sea por razones económicas, sociales o ambientales, no es posible realizar el proceso extractivo a tajo abierto, y se desarrolla por debajo de la superficie del terreno.

Para la ejecución de esta actividad en un ambiente seguro, es necesario contar con ventilación, además de infraestructura como túneles, pozos, chimeneas y galerías, misma infraestructura que limita el tamaño de la maquinaria que se puede usar en la operación. Los equipos más usados son perforadoras mineras, palas cargadoras, grúas de levante, *shotcrete*, rozadoras, etc. En la Figura 8 se observa cómo lucen dos minas subterráneas:



(a)



(b)

Figura 8. Minería subterránea. (a) Tambomayo, Buenaventura. Mina subterránea en Arequipa, produce oro y plata. [28] (b) Cerro Lindo, Milpo. Mina subterránea en Ica, produce concentrados de zinc, plomo, plata y cobre [29]

Para realizar la actividad de extracción, la ley obliga a contar con una concesión de beneficio, que es una concesión minera que “confiere al titular minero la facultad de extraer o concentrar la parte valiosa de un agregado de minerales desarraigados, y/o a fundir, purificar o refinar metales, mediante un conjunto de procesos físicos, químicos o físicos-químicos” [30].

De acuerdo a la información recabada en el 2011 por el MINEM, en el Perú existen 245 concesiones mineras superficiales y 130 subterráneas [27], siendo los departamentos con más concesiones: La Libertad (25 superficial y 50 subterránea), Arequipa (29 superficial y 33 subterránea), Lima (32 superficial y 23 subterránea), Ancash (18 superficial y 22 subterránea) y Junín (74 superficiales y 17 subterráneas).

### 1.5.1. Proceso de extracción de una mina subterránea

Según Murray Canfield [31], los principales procesos que componen la etapa de producción en una mina son: la extracción, el procesamiento, la fundición y la refinación. “La extracción subterránea se desarrolla bajo tierra y combina distintas técnicas que permiten que el proceso ocurra a grandes niveles de profundidad. Las principales labores dentro del proceso de extracción subterránea tienen relación con tronar y avanzar en zonas de producción, fortificando y habilitando zonas de trabajo que, bajo altos estándares de seguridad, permitan extraer el mineral desde el yacimiento” [32]. En la Figura 9 se presenta de manera visual el proceso de extracción de una mina.

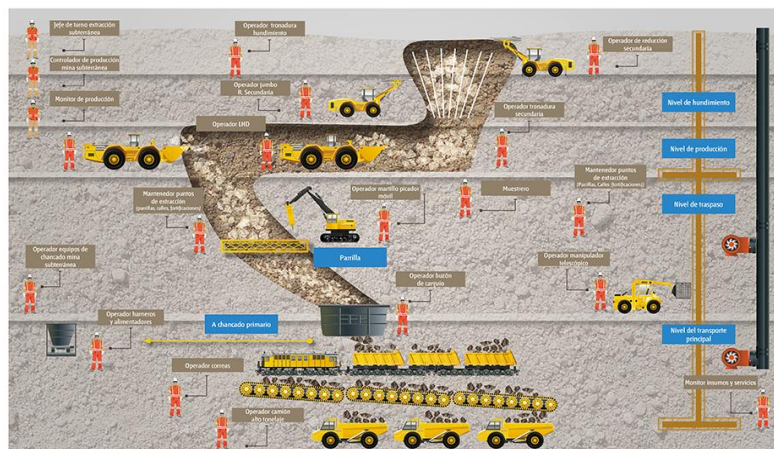


Figura 9. Extracción en una mina subterránea. Fuente: CCM [32]

## 1.6. Accidentalidad en minas

Ya en contexto con la minería, es importante recalcar que, a mayor tiempo de estadía dentro de mina, aumentan los riesgos de accidentalidad para el personal. En el caso del personal transitivo, como por ejemplo los choferes, es factible reducir el riesgo al que se exponen mediante la reducción del tiempo de espera de las unidades en cola dentro de mina. Es importante también entender los conceptos básicos de la seguridad y los riesgos en las minas peruanas, y conocer sobre los accidentes que ocurren durante la operación minera.

Los accidentes son definidos de diferentes maneras; sin embargo, la definición de accidente es un tanto general para el contexto minero, pues estos ocurren en diferentes situaciones y ambientes. Para minería, una definición bastante acertada es la siguiente:

Un accidente se puede definir como un acontecimiento no deseado que puede resultar en daño a las personas, daño a la propiedad o pérdidas en el proceso. Es el resultado del contacto con una sustancia o una fuente de energía por encima de la capacidad límite del cuerpo humano o de la estructura. Desde el punto de vista de las personas, el contacto puede ocasionar un corte, quemadura, abrasión, fractura, o la alteración o interferencia de alguna función normal del cuerpo (cáncer, asbestosis, ahogamiento). Desde el punto de vista de la propiedad, puede ocasionar incendio, destrucción, deformación [33].

Por la naturaleza de la operación minera, las personas en las minas están expuestas a diferentes condiciones inseguras, que podrían terminar en accidentes mortales. Estos son registrados año a año y publicados en reportes por el MINEM. Según esta entidad, las principales causas de los accidentes mencionados son las siguientes:

1. Desprendimiento de rocas
2. Golpes por vehículo motorizado (tránsito)
3. Caídas de personas
4. Atrapado por derrumbe, deslizamiento, soplado de mineral o desmonte
5. Intoxicación, asfixia, absorción, radiaciones
6. Otros tipos

El porcentaje de ocurrencias de estos accidentes durante los últimos 10 años en el Perú se pueden observar en el gráfico de la Figura 10:

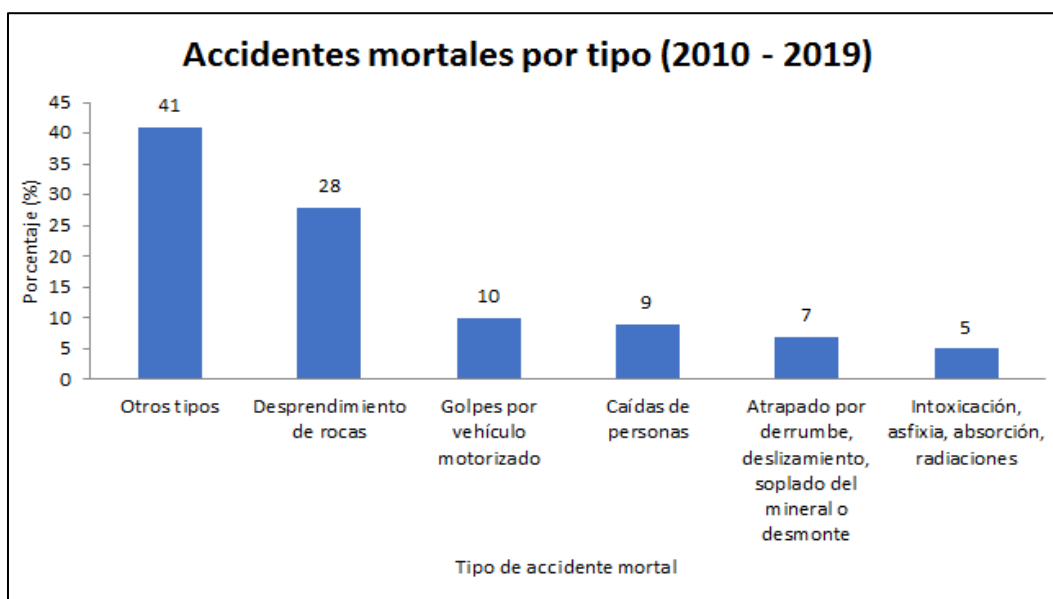


Figura 10. Accidentes por causa en los últimos 10 años (MINEM) [2]

A continuación, en la Tabla 5, se presenta la información de los accidentes incapacitantes ocurridos en cada una de las Unidades Mineras de Buenaventura en lo que va del año 2021 (desde el inicio del año hasta el 21 de marzo).

Unidad/Proyecto minero	Accidentes incapacitantes (Acumulado)	Incidentes	Accidente leve	Accidente grave	Accidentes mortales
Tambomayo	4	2	0	2	0
La Zanja	0	0	0	0	0
Rio Seco	3	2	1	0	0
Uchucchahua	3	2	1	0	0
El Brocal	11	0	1	10	0
Julcani	6	3	1	2	0
Mallay	0	0	0	0	0

Orcopampa	0	0	0	0	0
Tantahuatay	1	0	0	1	0
Trapiche	0	0	0	0	0
San Gabriel	0	0	0	0	0
Conehua	0	0	0	0	0
Exploraciones	0	0	0	0	0
Lima	0	0	0	0	0
Total	28	9	4	15	0

Tabla 5. Personal con accidentes incapacitantes en Buenaventura 2021. Elaborado con información recibida de las empresas Buenaventura y FC transportes.

Adicionalmente, en la Figura 11 se presenta un gráfico pie que muestra la frecuencia de los tipos de accidentes para facilitar la comparación estadística de estos datos y evaluar la relevancia de los riesgos dentro de mina.

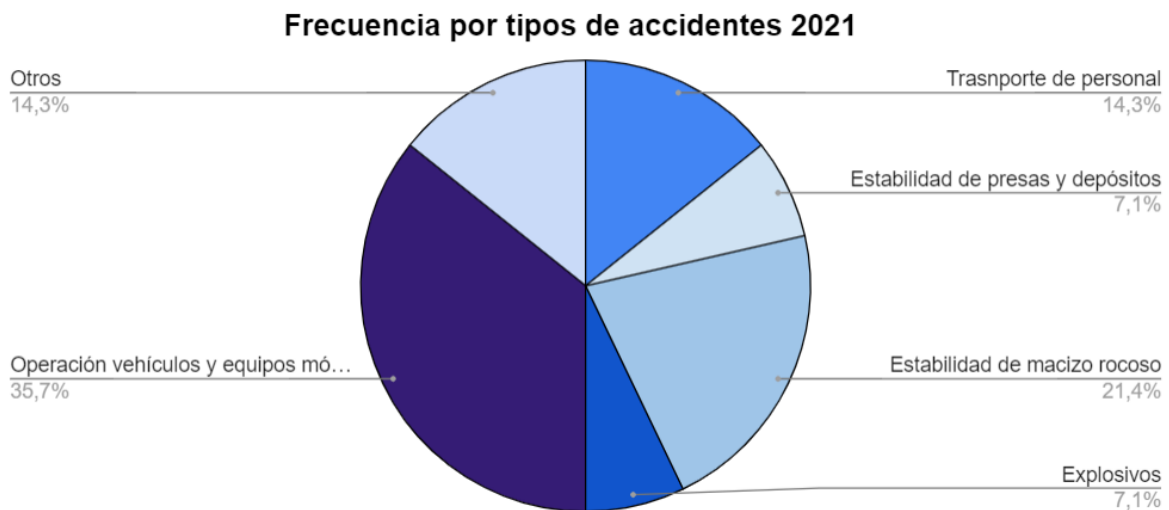


Figura 11. Frecuencia por tipos de accidentes 2021 de la empresa Buenaventura.

Información recopilada de las empresas Buenaventura y FC Transportes.

### 1.6.1. Clasificación de los accidentes de trabajo de acuerdo a la gravedad

Para clasificar los accidentes existen diferentes criterios; pero en Perú se realiza generalmente de acuerdo a la gravedad: incidente (que no produce lesiones ni daños), accidente leve (que produce daños materiales a la propiedad), accidente grave (que produce lesiones menores, sin incapacidad), accidente muy grave (que produce lesiones incapacitantes, con pérdida de más de tres días) y accidente mortal (que produce el deceso). Tomando esta clasificación, el investigador estadounidense Frank Bird propone la siguiente pirámide de control de riesgos, en la que explica que, por cada accidente fatal, se presentan 10 graves, 30 accidentes leves y 600 incidentes [34]. La pirámide se muestra en la Figura 12.

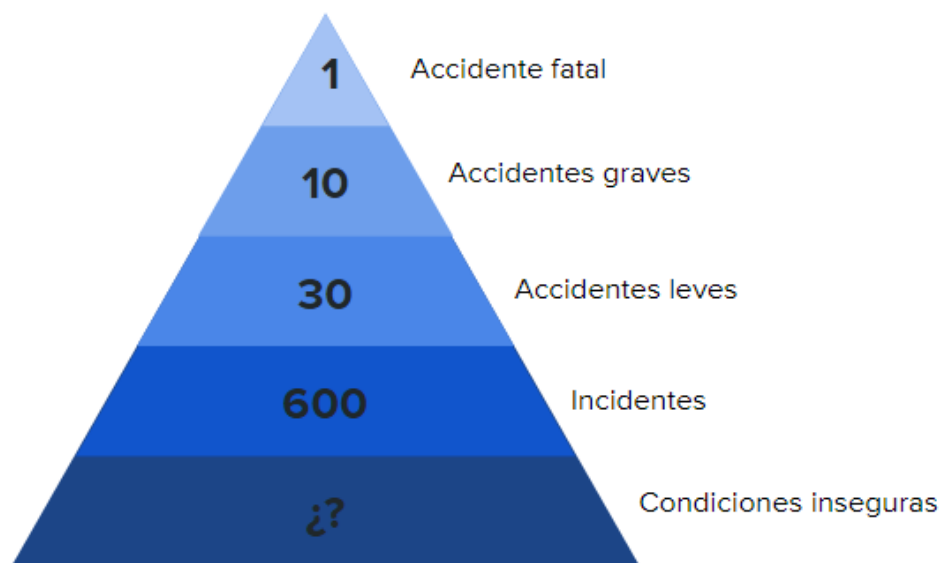


Figura 12. Pirámide Frank Bird (Elaboración propia)

De esta pirámide se infiere entonces, que para reducir la cantidad de accidentes fatales es necesario reducir la cantidad de accidentes graves, y a su vez la cantidad de accidentes leves, incidentes y condiciones inseguras.

#### Matriz AMEF

En toda empresa existe la posibilidad de que los procesos no salgan de la manera planeada; y cuando esto sucede, las consecuencias pueden ser tan graves como la avería de

alguna máquina, la lesión de alguna persona o incluso la muerte; como también puede que ni la operación ni las personas involucradas se vean afectadas. Como se mencionó, los choferes de la empresa transportista aumentan su exposición a riesgos al estar más tiempo esperando en cola. Siendo tan variable el impacto que podría generar cualquier incidente, una metodología para cuantificar los riesgos es el Análisis Modal de Efectos y Fallas (o matriz AMEF); esta trabaja en hallar un indicador de riesgos conocido como “Número Prioritario de Riesgo” (NPR) para las fallas potenciales. Este indicador es el producto de tres factores: la severidad, la ocurrencia y la detección de cada riesgo potencial, cuyos valores son estimados entre 1 y 10 de acuerdo a la prioridad asignada. El producto de estos tres factores será un valor entre 1 y 1000, y calcular el NPR para cada riesgo identificado permitirá priorizar la toma de acciones preventivas o correctivas. Si el valor del NPR en algún riesgo es superior a 100, entonces “es un claro indicador de que deben implementarse acciones de prevención o corrección para evitar la ocurrencia de las fallas, de forma prioritaria.” [35]

En la presente tesis, se utilizó la matriz AMEF para calcular el NPR de las fallas potenciales dentro de mina en el proceso de espera y descarga, y también para calcular el NPR de las fallas potenciales para las unidades en tránsito. Ambos valores fueron utilizados como indicadores de riesgos y la información fue recopilada de acuerdo a las entrevistas realizadas a los expertos involucrados en la operación (choferes, supervisores y jefe de operación). Se utilizó la pirámide de Frank Bird para definir la severidad de cada falla potencial. El valor va de 1 a 2 cuando la falla podía generar condiciones inseguras; de 3 a 4 cuando podía generar incidentes, de 5 a 6 cuando podía generar accidentes leves, de 7 a 8 cuando podía generar accidentes graves y de 9 a 10 cuando podía generar accidentes fatales. En la metodología se explica con mayor detalle el uso de esta herramienta para cuantificar los riesgos en el proceso de abastecimiento de cemento a la mina Tambomayo.

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

La metodología de esta tesis está dividida en tres partes: el paso a paso del proceso seguido, la determinación de las variables contextuales que influyen en el proceso de abastecimiento a la mina Tambomayo, y las fuentes de información utilizadas en el desarrollo de la tesis.

En el paso a paso del proceso a seguir, se explicará a detalle la metodología utilizada en el desarrollo de la tesis, que se resume en: recopilar información, tanto data histórica como entrevistas, y analizarla de manera que se pueda definir los criterios y decisiones a tomar en la implementación del *hub*, como la ubicación que deberá tomar el mismo, y una vez definida, se utilizará el tiempo de camino hasta la mina como input para crear la simulación del escenario propuesto. La simulación de los escenarios será utilizada para responder qué impacto puede tener el *hub* en la cadena y cómo cuantificar este. Los resultados obtenidos luego de correr el modelo brindarán la información necesaria para definir las dimensiones del *hub*. Por último, serán definidas las políticas y restricciones que el *hub* logístico debe cumplir para lograr el óptimo funcionamiento del modelo de operación, y se brindarán recomendaciones relacionadas a la implementación de la propuesta de mejora.

#### **2.1. Paso a paso del proceso a seguir**

Como parte de la metodología, se desarrollará la siguiente secuencia de pasos:

##### **1. Recopilar información:**

- Se recopiló información tanto de la empresa transportista como de la minera. La empresa transportista brindó los datos históricos detallados de viajes desde enero de 2019 hasta marzo de 2020. En los detalles de cada viaje, las



variables que luego serían analizadas son: fecha de salida de Yura, fecha y hora de llegada a mina, fecha y hora de descarga, y fecha de salida de mina.

- Se realizaron también entrevistas a los choferes encargados de la operación, para obtener *insight* apropiado sobre cada paso del transporte del cemento desde el almacén en Yura hasta Tambomayo, y sobre los problemas y posibles riesgos identificados en el proceso y las causas potenciales de los elevados costos de *stand by*.
- Se conversó con el Vicepresidente de Finanzas y Administración y el Gerente de Supply Chain de la empresa Buenaventura sobre la relevancia del proyecto y la posibilidad de expansión. Ellos demostraron gran interés en el desarrollo del *hub*, y propusieron la expansión del mismo a la mina Orcopampa, y la posibilidad de suministrar otros insumos además del cemento. Para evaluar esta posibilidad, brindaron acceso al detalle de costos en cemento de la empresa para las unidades mineras Tambomayo y Orcopampa en el periodo enero - junio 2018, y el porcentaje de estos frente a los costos de suministros.
- Inclusive, se entrevistó al personal de la empresa transportista, para definir los criterios más importantes a considerar en la implementación del *hub* logístico (acceso a servicios, tiempo de respuesta a mina, ubicación respecto a zonas de conflicto, climatología y altura, poblaciones aledañas, etc.)

## 2. Analizar datos:

Se realizó un análisis exhaustivo de la información de cada viaje. Primero, se buscó relacionar algunas de las variables para hallar tendencias o correlaciones entre ellas. Se analizaron también las distribuciones del tiempo entre pedidos que salen de Yura, del tiempo entre llegadas a mina, del tiempo entre unidades descargadas y del tiempo entre cada salida de mina, así como las distribuciones del tiempo de cola (desde la llegada a mina hasta la descarga) y del tiempo total del proceso (desde la salida de Yura hasta la salida de mina). Se realizaron pruebas de bondad de ajuste y de verosimilitud para asegurar que el comportamiento de algunas de estas variables se ajustaba a distribuciones conocidas; sin embargo, no era el caso

de todas las variables mencionadas. Para el diseño de la simulación solo fueron requeridas dos de estas variables como *inputs*: el tiempo entre pedidos que salen de Yura y el tiempo entre unidades descargadas. Esto fue decidido tras comprobar que los valores analizados variaban entre 4 opciones. Las dos variables tomadas como *input* fueron modeladas con una distribución discreta estimando la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los valores. En la discusión de resultados se presentará más detalle del análisis de estas probabilidades. Se realizó también el análisis descriptivo de las siguientes variables: cantidad de unidades descargadas por día, cantidad de unidades en cola por día y cantidad de unidades en tránsito por día.

3. Definir criterios a tener en cuenta para evaluar la factibilidad del *hub*. Como fue mencionado, estos criterios fueron definidos mediante entrevistas a los *stakeholders* principales del proceso, tales como el Jefe de Operaciones, el Supervisor del Almacén en Arequipa y el Gerente General de FC Transportes, y también el Vicepresidente de Finanzas y Administración y el Gerente de Supply Chain de la empresa Buenaventura. Los criterios definidos son los siguientes:
  - Costos totales por *stand by*: la principal función del *hub* logístico será disminuir los costos totales por *stand by*. Esto implicará una reducción en las horas de cobertura de las unidades que transportan el cemento.
  - Tiempo de respuesta: El *hub* debe estar ubicado en donde el tiempo de respuesta ante una solicitud sea el mínimo posible.
  - Riesgos asociados: Las características del *hub* deben permitir la mayor reducción posible de los riesgos asociados al transporte de los insumos.

4. Selección de ubicación para el *hub*

Para determinar la ubicación del *hub* se utilizará el análisis de concordancia, pues en este caso se busca definir la opción óptima para la ubicación del *hub*, considerando diferentes criterios que predominan unos entre otros. De los métodos de análisis de concordancia, se utilizará Electre I, dado que el objetivo es seleccionar, según criterios verdaderos, solo una de las diferentes opciones de decisión, que representan las posibles ubicaciones que podría tomar el *hub* logístico.

De esta manera, la ubicación seleccionada permitirá determinar el tiempo de respuesta ante los pedidos de la mina. En este caso, las opciones de decisión consideradas son 4 lugares que cuentan con la posibilidad de expandir las dimensiones del *hub* de acuerdo a la cantidad de tractos y bombonas que este necesite albergar. Estas alternativas son:

- Desvío a Espinar (Antes del pueblo de Caylloma)
- Almacén de Buenaventura (Dentro del pueblo de Caylloma)
- Curva hacia Tambomayo (Salida del pueblo de Caylloma)
- Pueblo de Tapay (En la falda de la montaña de Tambomayo)

En la Figura 13 se muestra una vista satelital de las 4 opciones para el *hub* y la ubicación de la mina Tambomayo:



Figura 13. Vista satelital de la UM Tambomayo y las 4 posibles ubicaciones del *hub*

Los criterios para evaluar cada alternativa se definen según un análisis de preferencias [14]; en este caso, las personas que participaron en este análisis fueron los principales *stakeholders* del proceso (el Jefe de Operaciones, el Supervisor del Almacén en Arequipa y el Gerente General de la empresa FC Transportes). Los criterios definidos fueron los siguientes:

- Cr1 → Accesos a servicios (Luz, agua e internet)
- Cr2 → Tiempo de respuesta a mina
- Cr3 → Ubicación respecto a zonas de conflicto

- Cr4 → Climatología y altura (m.s.n.m)
- Cr5 → Poblaciones aledañas y de paso por ruta

Se definió también, según el análisis realizado, pesos de importancia  $W_j$  para los 5 criterios mencionados. Estos se presentan en la Tabla 6:

Peso de importancia para cada criterio					
Criterio	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5
Peso ( $W_j$ )	3	2	2	2	1

Tabla 6. Peso de importancia para cada criterio. Elaboración propia.

Las características de las 4 opciones fueron recopiladas mediante el análisis con los *stakeholders* principales en la operación y corroboradas con el uso de Google Earth. La Tabla 7 muestra el resultado de los criterios de evaluación según cada opción:

Características de las opciones según los criterios					
	Criterio 1 (Acceso a servicios)	Criterio 2 (Tiempo de respuesta a mina)	Criterio 3 (Zonas de conflicto)	Criterio 4 (Clima y altura-m.s.n.m)	Criterio 5 (Poblaciones aledañas)
Opción 1 (Desvío espinar)	Agua y luz	4h, 17min -68km	En posible zona de conflicto	3,800 m.s.n.m. Clima polar	2 pueblos aledaños
Opción 2 (Almacén Buenaventura)	Luz, agua e internet	3h, 33min - 56.5km	En medio de zona de conflicto	3,484 m.s.n.m. Clima polar	1 pueblo aledaño
Opción 3 (Salida de Caylloma)	Agua y luz	3h, 27min - 53.4km	Fuera de zona de conflicto	4,332 m.s.n.m. Clima polar	1 pueblo aledaño
Opción 4 (Tapay)	Luz, agua e internet	5h, 47min - 202km	Atraviesa zonas de conflicto	2,984 m.s.n.m. Clima polar	3 pueblos aledaños

Tabla 7. Características de las opciones según los criterios. Elaboración propia.

Además, según lo parametrado en el análisis, se definió una escala cuantitativa para evaluar cada criterio, que no necesariamente es la misma para

todos los criterios. Estas escalas se presentan en la Tabla 9. Dado que estas escalas no son iguales para todos los criterios, se definió también una escala cualitativa para homogenizar la evaluación. Esta escala se presenta a continuación, en la Tabla 8:

Escala cualitativa de los criterios	
Estatus	Escala
Muy beneficioso	MB
Beneficioso	B
Neutral	N
Adverso	A
Muy adverso	MA

Tabla 8. Escala cualitativa de los criterios. Elaboración propia.

Según lo mencionado, en la Tabla 9 se muestran las escalas cuantitativas definidas para cada criterio según el análisis realizado con el equipo de FC Transportes.

Relación entre valores de calificación cualitativa y cuantitativa					
Para los criterios 1, 2 y 4	MB	B	N	A	MA
	20	15	10	5	0
Para los criterios 3 y 5	MB	B	N	A	MA
	12	10	8	6	4

Tabla 9. Relación entre valores de calificación cualitativa y cuantitativa.

Elaboración propia.

Habiendo asignado valores cuantitativos y cualitativos a los criterios, se procedió, según el análisis realizado con el equipo de FC Transportes, a definir el valor de cada criterio correspondiente a cada opción según sus características, mostradas en la Tabla 7. A continuación, se presenta la Tabla 10 con los valores cualitativos definidos para cada opción según las entrevistas realizadas:

Valores cualitativos de cada opción según los criterios definidos					
	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5
Op1	B	MB	A	N	A
Op2	MB	N	N	N	N
Op3	B	N	MB	A	N
Op4	MB	A	MA	B	MA

Tabla 10. Valores cualitativos de cada opción según los criterios definidos.

Elaboración propia.

Tomando en consideración las escalas definidas en la Tabla 9, a continuación se presenta la Tabla 11, que presenta, para cada opción y cada criterio, el valor cuantitativo correspondiente a cada valor cualitativo de la Tabla 10:

Valores cuantitativos de cada opción según los criterios definidos					
	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5
Op1	15	20	6	10	6
Op2	20	10	8	10	8
Op3	15	10	12	5	8
Op4	20	5	4	15	4

Tabla 11. Valores cuantitativos de cada opción según los criterios definidos.

Elaboración propia.

Continuando con el método Electre I, se procede a calcular las variables  $W$  y  $\delta_j$  para todos los criterios  $j$ . Donde  $\delta$  es la diferencia máxima de los puntajes  $g_j$  en cualquier criterio. Recordando lo mencionado anteriormente,  $g_j$  representa el puntaje de una alternativa bajo el criterio  $j$ . Para ello serán utilizadas las ecuaciones 2 y 4 respectivamente:

$$W = \sum_{j=1}^5 W_j = 3 + 2 + 2 + 2 + 1 = 10$$

$$\delta_1 = 20 - 15 = 5$$

$$\delta_2 = 20 - 5 = 15$$

$$\delta_3 = 12 - 4 = 8$$

$$\delta_4 = 15 - 5 = 10$$

$$\delta_5 = 20 - 15 = 4$$

Por lo tanto:

$$\delta = \max \delta_i = \{5; 15; 8; 10; 4\} = 15$$

Conociendo los valores de W y  $\delta$  se procede a calcular la matriz de concordancia y discordancia según las ecuaciones 1, 3 y 4. A continuación se muestran las Tablas 12 y 13, que representan las matrices C y D:

Matriz de Concordancia				
<b>C</b>	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.4	0.7	0.5
Op2	0.8	X	0.8	0.8
Op3	0.6	0.5	X	0.5
Op4	0.5	0.5	0.4	X

Tabla 12. Matriz de Concordancia. Elaboración propia.

Matriz de Discordancia				
<b>D</b>	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.33	0.40	0.33
Op2	0.67	X	0.27	0.33
Op3	0.67	0.33	X	0.67
Op4	1.00	0.33	0.53	X

Tabla 13. Matriz de Discordancia. Elaboración propia.

##### 5. Cuantificar riesgos de la operación en ruta y en mina

Para llevar los riesgos cualitativos a una escala cuantitativa, se trabajó con la matriz AMEF. Como fue mencionado anteriormente, esta herramienta sirve para analizar fallos potenciales en los procesos; en este caso fue aplicada para el proceso



de abastecimiento de cemento. Luego de entrevistar a los *stakeholders* se definieron las actividades dentro del flujo del proceso y los valores de cada actividad correspondientes a cada variable de la matriz AMEF: severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D). Estos 3 valores fueron multiplicados para calcular el NPR (SxOxD). A continuación, las Tablas 14 y 15 se muestran las matrices AMEF resultantes de los dos tramos en que se divide la cadena de suministro de cemento a la mina: el tiempo en mina (Tabla 14) y la ruta a mina (Tabla 15).

Proceso de espera y descarga en el cilo de 70 Tn	Actividad	Falla potencial	Efecto potencial de falla	S	Causas potenciales de falla	O	Control actual del proceso	D	NPR
	Ingreso a mina	Choques	Incidente en la unidad y otras máquinas o equipos dentro de mina	8	Suelo enlodado o congelado, y desorganización en la cola	5	Vigilantes y supervisores encargados de la cola	7	280
	Traslado a zona de descarga	Volcadura	Accidentalidad de las personas cerca de la unidad	10	Traslado inescrupuloso del chofer	1	Controles sobre las unidades dentro de mina	3	30
	Espera en la cola para descargar	Enfermedad	Contagio a otros operarios dentro de mina	6	El clima en Tambomayo, los cambios de temperatura constantes	6	Por el Covid surgen procesos de revisión	5	180
	Traslado a zona de descanso y alimentación	Accidentalidad en el operario	Resbalones, caídas, torpezas por el suelo siniestrado por el clima	9	Suelo lodos y resvaloso. Traslados a pie dentro de mina	6	El operario debe informar de estos incidentes	8	432
	Descanso y alimentación	Falta de buenas condiciones para la espera	Incomodidades en el operario que afectan su performance	8	Desorganización entre áreas dentro y fuera de mina	8	El operario y agentes de BV son los que comunican estas faltas y necesidades	7	448
	Descarga en el cilo	Lesiones en el operario	El operario no está en capacidad de manejar la unidad, debe quedarse en mina más tiempo hasta que llegue la unidad de recojo	8	Mala manipulación de los elementos y equipos de descarga. Mal uso de las herramientas, como la comba.	3	Hay procedimientos y capacitaciones para la descarga	2	48
		Olvido de EPP's	El operario puede sufrir de lesiones graves o hasta mortalidad, BV y FC se ven perjudicados	9	Distracción del operario	2	Hay procedimientos y capacitaciones para la descarga	3	54
		Intoxicación	Problemas de visión y respiración en el operario	8	Mala conexión de la manguera de descarga	2	BV tiene seguimiento de los operarios, más es personalizado	7	112
	Salida de mina	Falta de papeleo	La facturación y verificación del servicio se ve perjudicada por retrasos	8	Distracción del operario	6	Los controles de FC y BV no son a tiempo real. No hay trazabilidad.	7	336

Tabla 14. Matriz AMEF para riesgos en la mina

De la tabla mostrada:

- Los **FALLOS A MONITOREAR** son aquellos con NPR menor o igual a 30.
- Los **FALLOS EN ALERTA** son aquellos con NPR mayor a 30 y menor o igual a 100.
- Los **FALLOS A ATENDER** son aquellos con NPR mayor a 100.

Proceso de tránsito a la mina Tambomayo	Actividad	Falla potencial	Efecto potencial de falla	S	Causas potenciales de falla	O	Control actual del proceso	D	NPR
	Tránsito en ruta hacia mina. Yura → Sibayo → Condorcuyo → Caylloma → Mina Tambomayo	Choques frontales	La unidad y el chofer sufren un accidente de choque	7	Curvas peligrosas y altas velocidades en el manejo	5	El centro de control nota irregularidades en la ruta y el GPS	5	245
		Derrumbes/Huaycos	La ruta está siniestrada, impidiendo el paso	7	Climatología hostil de la sierra	5	El chofer debe observar los derrumbes o huaycos para informar al CC	7	245
		Rotura del muelle	Los muelles de la bombona se rompen por la fatiga	8	Fatiga del muelle por la constantes vibraciones y golpes	6	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	2	96
		Cierre de carreteras por mantenimiento	Las unidades no pueden continuar la ruta	4	El mal estado de la ruta y por ende la obligación de repararlas	5	El centro de control está en constante información con las poblaciones aledañas	4	80
		Paro de comunidades	Las unidades no pueden continuar la ruta	9	Las poblaciones aledañas reclaman al estado y la empresa	4	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	2	72
		Volcadura	El tracto o la bombona se vuelcan en la ruta a mina	10	Distracción del chofer o zonas no bien señaladas	2	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	3	60
		Caída al precipicio	La unidad sufre un accidente de caída al barranco	10	Sueño del chofer o falta de visibilidad de la ruta	2	El centro de control nota irregularidades en la ruta y el GPS	3	60
		Revienta una llanta	Una o más llantas de la unidad se revientan por el uso y complicaciones de ruta	6	Estado no adecuado de la ruta, precipitaciones, huecos, etc	9	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	1	54
		Malestar, fatiga, sueño del chofer	Incomodidad del chofer al realizar su trabajo	8	Falta de descanso del chofer, mala noche	3	El chofer informa al puesto de control sobre su situación	2	48
Falta de gasolina		La unidad se queda sin combustible	6	El chofer no cargó la cantidad adecuada de combustible	1	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	1	6	
Espera en Condorcuyo	Robo	La unidad, sus partes o el suministro son robados	10	Descuido del chofer y pernocte al aire libre de las unidades	2	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	4	80	

Tabla 15. Matriz AMEF para riesgos en tránsito a la mina

De la tabla mostrada:

- Los **FALLOS A MONITOREAR** son aquellos con NPR menor o igual a 30.
- Los **FALLOS EN ALERTA** son aquellos con NPR mayor a 30 y menor o igual a 100.
- Los **FALLOS A ATENDER** son aquellos con NPR mayor a 100

## 6. Simular escenarios

Se utilizó el lenguaje Python para realizar la simulación de dos escenarios: uno de la actual cadena de suministro de cemento y uno de la misma implementando un *hub* logístico. Para corroborar el impacto de la implementación del *hub* serán comparados 3 indicadores: el tiempo de respuesta a la mina, el costo por penalidad de *stand by*, y los riesgos asociados a la estadía de cada unidad en la mina. Para que ambas configuraciones sean en base a datos reales, se colocó como *inputs* en la simulación los valores de la información analizada anteriormente. Los

resultados fueron extraídos en archivos csv mostrando cuadros con la información detallada de las diferentes actividades simuladas en cada escenario. El detalle del diseño de cada escenario y de los resultados obtenidos será explicado en la siguiente sección (Discusión de resultados).

#### 7. Comparar y analizar resultados

Luego de simular los escenarios, se analizaron los resultados obtenidos para cada criterio definido (costos de *stand by*, tiempo de respuesta y riesgos asociados). Se realizó también una tabla con el resumen de los resultados de cada criterio para cada escenario simulado (actual y propuesto). Los resultados del análisis también brindaron información sobre la capacidad mínima necesaria del *hub* para realizar la operación con un flujo continuo y sin roturas de *stock*. Esta información será necesaria para definir meticulosamente el dimensionamiento y *layout* del *hub*, en caso se tome la decisión de construirlo.

#### 8. Estimar la inversión y tiempo de recuperación

Se realizó la estimación de la inversión para la implementación del *hub* y los costos de operación del mismo. Para el cálculo de la inversión, se consideró: el movimiento de tierras, la infraestructura, el arrendamiento de metros cuadrados, la mano de obra, las contingencias y los equipos necesarios dentro de las instalaciones. Para estimar los costos operativos se consideró la mano de obra del personal del *hub*, el arrendamiento de metros cuadrados y los servicios (agua, luz, internet, alimentación). Se realizó un análisis de flujo de caja considerando los primeros 7 años desde la inversión inicial, para calcular el tiempo de recuperación de la inversión.

#### 9. Plantear recomendaciones

A partir de los resultados, se plantearon recomendaciones a las empresas con respecto a la implementación del *hub*, relacionadas a la capacidad y dimensionamiento del *hub*, la localización del *hub*, la extensión del proyecto, las políticas tanto dentro del *hub* como de requerimiento, entre otras.

## **2.2. Variables contextuales a considerar**

Existen variables que pueden afectar el proceso de abastecimiento a mina pero que no pueden ser manipuladas, estas son llamadas variables contextuales. Algunas de las variables contextuales identificadas en el proceso de abastecimiento a mina son: (1) la climatología, (2) la variabilidad de la demanda mencionada anteriormente y (3) los problemas sociales. Ninguna de estas tres variables puede ser controlada, y las tres pueden afectar el proceso.

La climatología es un factor crítico en el abastecimiento de suministros a la mina, y afecta tanto al transporte de insumos (dado que según las condiciones del clima el estado de la ruta va a variar ya sea que esté fangoso, helado, seco, etc) como a la operación en mina (pues eventos climáticos como tormentas pueden impedir la continuación de la operación en mina). Esto trae como consecuencia la variabilidad de la demanda, dado que un paro o alguna variación en la operación pueden alterar el requerimiento programado de insumos. La demanda no puede ser controlada además porque, como fue mencionado anteriormente, depende de las etapas de exploración y explotación y las condiciones de la tierra, que se van descubriendo a lo largo del proceso. En otras palabras, la variabilidad de la demanda se vuelve impredecible. Finalmente, habitualmente en la ruta hacia la mina ocurren paros sociales, en los que, por diferentes motivos, los pobladores de las comunidades aledañas restringen o impiden el paso a las unidades que se dirigen a la unidad minera, afectando el tiempo de respuesta a la mina.

## **2.3. Retos en la implementación de un *hub* logístico en la UM Tambomayo**

Los principales retos en la implementación y el desarrollo de un *hub* logístico en la cadena de suministro de la mina Tambomayo son los siguientes: (1) la corrección de la coordinación entre las áreas en mina y las áreas administrativas que se encuentran en Lima, (2) la adaptación del *hub* para el desarrollo de más de una operación, (3) la gestión del personal que trabajará en el *hub*, (4) la asignación de responsables de la gestión de las operaciones en el *hub* y (5) la integración de las actividades a realizar en el *hub* con las comunidades locales.

El primer reto mencionado conlleva a reestructurar la comunicación entre las partes con el fin de mejorar la veracidad de la información. El *hub* logístico sería utilizado para la operación de abastecimiento de cemento a la mina Tambomayo; sin embargo, está proyectado a ser el centro de distribución centralizado de más minas y *commodities*, lo cual podría complicar el desarrollo de las operaciones realizadas en él.

Es importante establecer las políticas con las que se trabajará en el *hub* y asegurar su cumplimiento por parte del personal; y así facilitar el cumplimiento del tercer y cuarto reto mencionado. Finalmente, la integración de las actividades a realizar en el *hub* con las comunidades locales puede ser cubierta dado que los pobladores de estas comunidades podrían ser contratados para cumplir las labores en el *hub*, y además los choferes que tengan que pernoctar en el *hub* pueden consumir en las zonas aledañas, generando así empleo y movimiento de la economía en las comunidades locales.

#### **2.4. Fuentes de información e instrumentos de medición**

La presente tesis fue basada en información obtenida principalmente de la empresa FC Transportes y soluciones especiales S.A.C y la empresa minera Buenaventura. Para salvaguardar el origen de los datos se aseguró a las empresas no compartir los documentos entregados a entidades ajenas al estudio de la tesis. Los archivos fueron recibidos en diferentes formatos, sea bases de datos, documentos de MS. Word y Excel, y correos. Algunos de los archivos recibidos son:

1. Hojas de ruta
2. Programación histórica del periodo enero - junio 2019 de la empresa FC Transportes.
3. Histórico de *stand by* de unidades de cemento del periodo enero - junio 2019.
4. Detalle de costos en cemento de la empresa Buenaventura para las unidades mineras Tambomayo y Orcopampa en el periodo enero - junio 2018, y el porcentaje de estos frente a los costos de suministros.
5. Porcentaje de ventas que las unidades mineras Tambomayo y Orcopampa representan con respecto a la empresa Buenaventura

Además, gran parte de la información obtenida fue gracias a:

1. Entrevistas a conductores de la empresa FC Transportes y Soluciones S.A.C.
2. Entrevistas y reuniones con los *stakeholders* y encargados de la operación por parte de la empresa FC Transportes y Buenaventura.

# CAPÍTULO III

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de esta tesis fueron obtenidos luego del análisis de la información recopilada y de la creación, análisis y comparación de escenarios con el modelo de simulación.

### 3.1. Análisis de datos

Se trabajó con los históricos de viajes del periodo enero a junio de 2019. Los datos obtenidos presentan información de diferentes variables, incluyendo la fecha de salida de Yura, la fecha y hora de llegada a mina, cantidad de cemento transportado, fecha y hora de descarga, entre otras variables.

Luego de realizar un análisis exploratorio, se llegó a la conclusión de que la frecuencia de requerimiento de cemento es variable a lo largo de todos los meses, y que la cantidad de días de *stand by* no depende de la cantidad de viajes realizados, como se observa en el Figura 14.

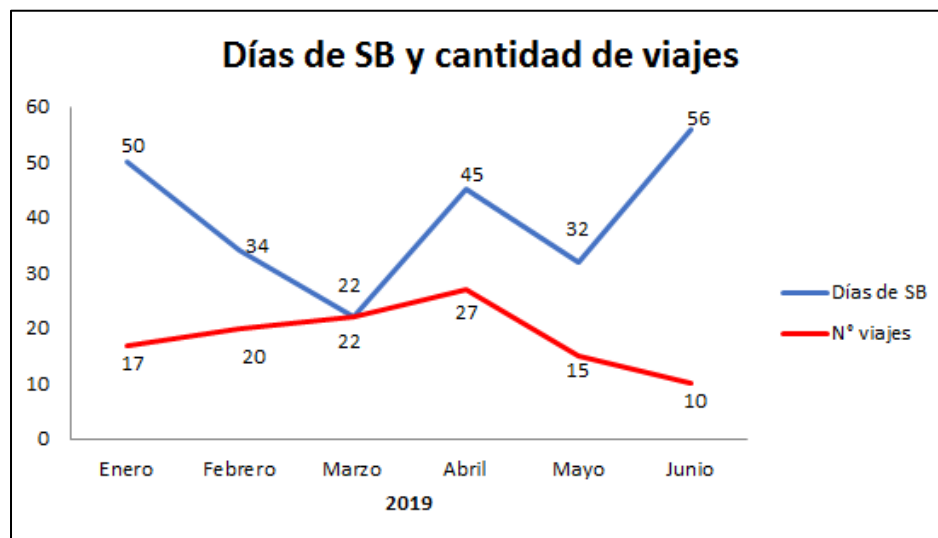


Figura 14. Días de *stand by* y cantidad de viajes

Además, luego de entrevistar a los responsables de la empresa transportista, se concluyó que la variabilidad de la cantidad de unidades de cemento requeridas también depende de factores externos como manifestaciones sociales, como es el caso del mes de agosto, en que la población de Caylloma realizó un paro en la ruta hacia mina lo cual redujo la cantidad de unidades que pasaron por la ruta hacia mina; o como el cambio de proveedor de servicios de almacenamiento y tratamiento de cemento, que sucedió el mes de noviembre del 2019, que se realizó el cambio de la empresa Robocon a la empresa Incimmet, causando que en los últimos meses del año 2019 solo sea registrada una cantidad mínima de viajes.

Con la información obtenida, se calculó que el monto perdido por *stand by* durante el periodo enero 2019 - junio 2019 fue S/. 119,000.00, y generó un aumento de 24% en el costo de transporte. Al representar un costo importante, se vio por conveniente realizar un análisis de la cantidad de unidades que la mina solicita y la cantidad de unidades que realmente necesita.

Para el análisis efectivo de lo mencionado en el párrafo anterior, se tomó información de la cantidad de unidades de cemento descargadas diariamente, asumiendo que esto representa la demanda de cemento. El resultado mostró que no hay una descarga diaria de unidades: el 51% de los días no había descargas. El resto de días, se descargó en su mayoría una unidad y muy pocas veces dos unidades (10% de los 181 días); y solamente una vez se descargaron 3 unidades. Esta información se muestra en el Figura 15.



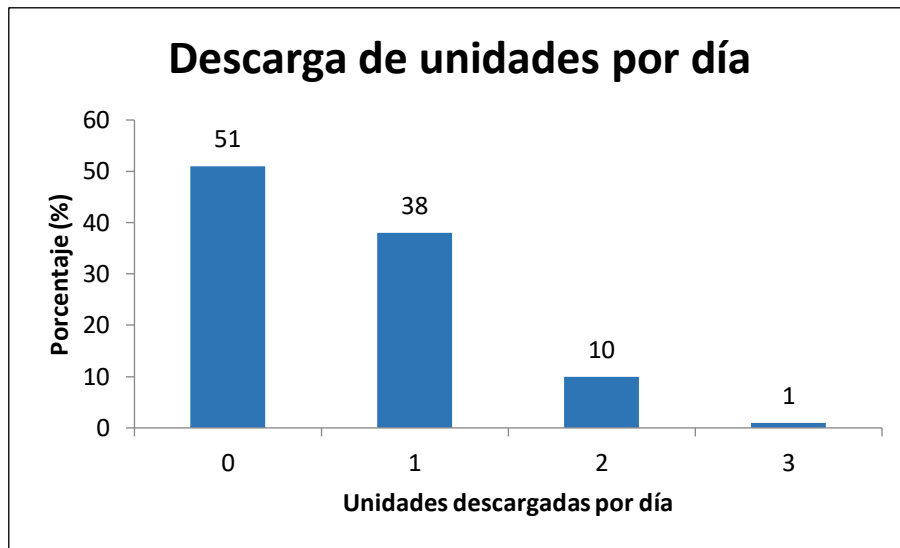


Figura 15. Porcentajes del número de unidades descargadas por día

Luego de realizar la evaluación de unidades descargadas por día, se procedió a revisar la cantidad de unidades en cola y la cantidad de unidades en tránsito. Analizando estas dos variables se observó que han ocurrido casos donde la cantidad de unidades en cola llegó a ser 6 el mismo día. Lo mismo ocurrió con las unidades en tránsito: esta variable llegó a ser 4 el mismo día. Esto se observa en el Figura 16:

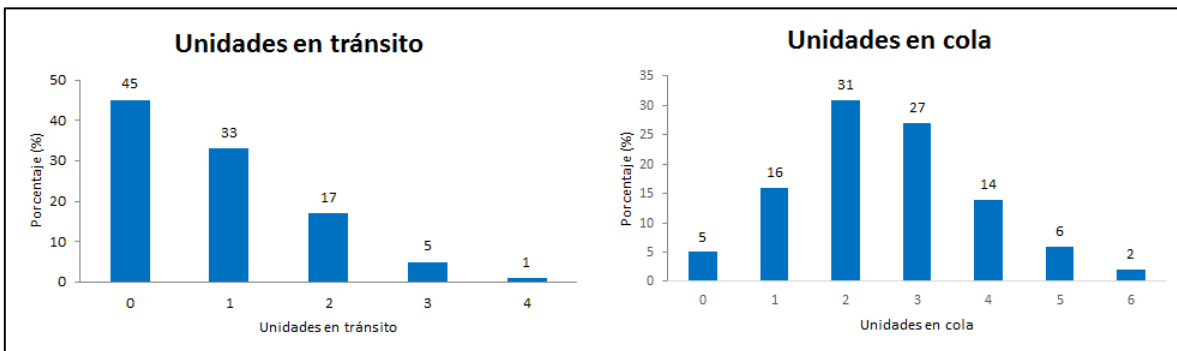


Figura 16. Análisis de unidades en cadena

Sabiendo que la cantidad de unidades que serán descargadas por día varía entre 0 y 1, y algunos casos 2, es inevitable preguntarse: ¿por qué la mina está emitiendo tantos pedidos? Una hipótesis está relacionada al tiempo de ruta desde Yura a la mina. A

continuación, en la Figura 17 se presenta un gráfico en el que se muestra el tiempo que se han demorado los camiones en la ruta en el periodo trabajado (*Lead time*):

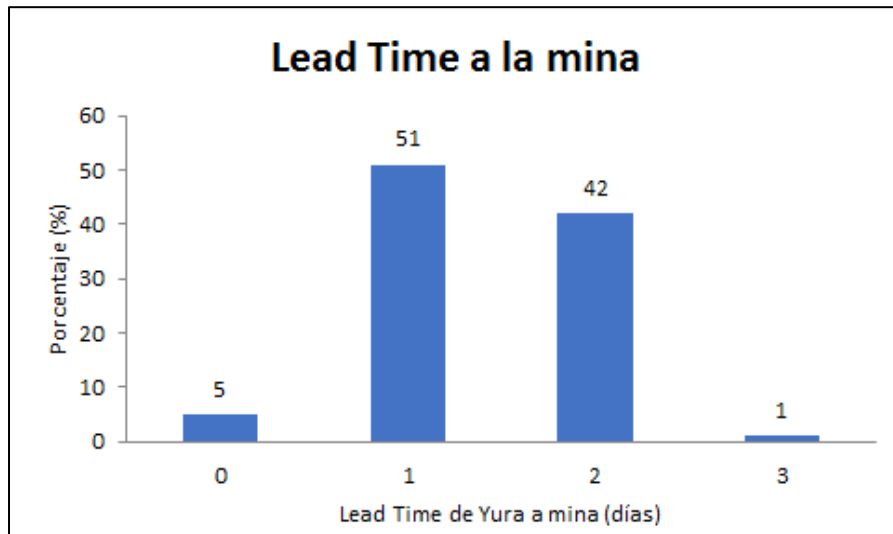


Figura 17. Tiempo de ruta a mina

Más del 90% de las veces, el tiempo de ruta ha variado entre 1 y 2 días. En la simulación, el tiempo de ruta se considera un día y medio, pues luego de conversaciones con los choferes sobre el tiempo real de la ruta, y considerando los resultados del análisis de esta variable, un día y medio representa el tiempo promedio de ruta.

Entonces, la primera hipótesis es que las áreas de Tambomayo solicitan unidades para utilizarlas como *stock*, pues las mantienen dentro de mina para contar con ellas cuando sea necesario y evitar la incertidumbre de no tener cemento, ya que las unidades pueden demorarse más de dos días en llegar.

Para realizar la simulación se utilizarán dos variables aleatorias discretas como *inputs*, que como se mencionó en la metodología, fueron analizadas en cuanto a la probabilidad de ocurrencia dado que los valores no se adaptaban a ninguna distribución conocida. Estos datos fueron obtenidos de los datos históricos detallados de viajes desde enero de 2019 hasta marzo de 2020, brindados por la empresa FC Transportes. A continuación se muestra el resultado del análisis de las dos variables:

- Tiempo entre pedidos que salen de Yura (días), en la Tabla 14:

Tiempo entre pedidos		
Tiempo en segundos	Tiempo en horas	Probabilidad estimada
43200	12	0.15
64800	18	0.085
86400	24	0.35
129600	36	0.09
172800	48	0.17
216000	60	0.1
259200	72	0.05
302400	84	0.005

Tabla 16. Tiempo en segundos y horas entre pedidos que salen de Yura

- Tiempo entre unidades descargadas, en la Tabla 15:

Tiempo entre descargas		
Tiempo en segundos	Tiempo en horas	Probabilidad estimada
43200	12	0.22
86400	18	0.36
129600	36	0.04
172800	48	0.22
216000	60	0.03
259200	72	0.08
302400	84	0.02
345600	96	0.03

Tabla 17. Tiempo en segundos y horas entre unidades descargadas

### 3.2. Ubicación escogida a través del método Electre I

El objetivo de Electre I es seleccionar el mejor par ordenado que una los valores de concordancia y discordancia,  $G(\hat{c}, \hat{d})$ . Para ello, se deben tener en consideración los valores escogidos de la matriz de concordancia y discordancia. En este caso se busca decidir la mejor ubicación para el *hub*. A continuación se realizará el análisis de comparación entre las matrices de concordancia y discordancia, analizando la relación entre cada  $G(\hat{c}, \hat{d})$ :

Para el primer análisis de las matrices de concordancia y discordancia se deben tomar los valores  $C=0.8$  y  $D=0.33$  [14]; de esta manera, el gráfico de las matrices realizadas consiste en las opciones 1, 2 y 3. La única opción fuera del objetivo es la 4 (*outranked by Op 2*).

En las Tablas 16 y 17 se muestra el primer análisis entre las matrices de concordancia y discordancia, específicamente con los valores  $C = 0.80$  y  $D = 0.33$ .

Matriz de concordancia - 1er análisis				
C	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.40	0.70	0.50
Op2	0.80	X	0.80	0.80
Op3	0.60	0.50	X	0.50
Op4	0.50	0.50	0.40	X

Tabla 18. Matriz de concordancia - primer análisis. Elaboración propia.

Matriz de discordancia - 1er análisis				
D	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.33	0.40	0.33
Op2	0.67	X	0.27	0.33
Op3	0.67	0.33	X	0.67
Op4	1.00	0.33	0.53	X

Tabla 19. Matriz de discordancia - primer análisis. Elaboración propia

Para  $G(0.8, 0.33)$ :  $Op2 > Op4$

Si **C=0.7** y **D=0.40**; el gráfico consiste en las opciones 1 y 2. La única opción fuera del objetivo es la 3 (outranked por Op 1)

En las Tablas 18 y 19 se muestra el segundo análisis entre las matrices de concordancia y discordancia, específicamente con los valores  $C = 0.70$  y  $D = 0.40$

Matriz de concordancia - 2do análisis				
<b>C</b>	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.40	0.70	0.50
Op2	0.80	X	0.80	0.80
Op3	0.60	0.50	X	0.50
Op4	0.50	0.50	0.40	X

Tabla 20. Matriz de concordancia - segundo análisis. Elaboración propia.

Matriz de discordancia - 2do análisis				
<b>D</b>	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.33	0.40	0.33
Op2	0.67	X	0.27	0.33
Op3	0.67	0.33	X	0.67
Op4	1.00	0.33	0.53	X

Tabla 21. Matriz de discordancia - segundo análisis. Elaboración propia.

Para  $G(0.7, 0.67)$ :  $Op1 > Op3$

Si **C=0.80** y **D=0.67**; el gráfico consiste en la opción 2. La opción 1 queda fuera del objetivo (outranked by Op 2)

En las Tablas 20 y 21 se muestra el tercer análisis entre las matrices de concordancia y discordancia, específicamente con los valores  $C = 0.80$  y  $D = 0.67$ .

Matriz de concordancia - 3er análisis				
C	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.40	0.70	0.50
Op2	0.80	X	0.80	0.80
Op3	0.60	0.50	X	0.50
Op4	0.50	0.50	0.40	X

Tabla 22. Matriz de concordancia - tercer análisis. Elaboración propia.

Matriz de discordancia - 3er análisis				
D	Op1	Op2	Op3	Op4
Op1	X	0.33	0.40	0.33
Op2	0.67	X	0.27	0.33
Op3	0.67	0.33	X	0.67
Op4	1.00	0.33	0.53	X

Tabla 23. Matriz de discordancia - tercer análisis. Elaboración propia.

Para  $G(0.8, 0.67)$ :  $Op2 > Op1$

Por lo tanto:  $Op2 >$  todas las otras opciones

Luego de haber desarrollado el método Electre I, se demuestra que la opción 2 (almacén de Buenaventura, situado en el pueblo de Caylloma) es la mejor ubicación del hub, seguido por el desvío a Espinar.

Con estas dos opciones podemos obtener el tiempo de respuesta del hub a la mina, este valor es un input necesario para la simulación. Es por ello, que se considerará en la simulación un tiempo de respuesta igual a 4 horas, que es el tiempo de camino desde el almacén en Caylloma hasta Tambomayo.

### 3.3. Simulación de escenarios

Una vez analizadas las variables y luego de determinar las distribuciones y parámetros de estas, se realizará un modelo de simulación con las dos configuraciones a ser comparadas: la cadena de suministro del abastecimiento de cemento con el *hub* (escenario

0) y sin el *hub* (escenario 1). El código creado para la simulación se puede descargar en el siguiente enlace: [https://github.com/marianaarriz/codigo\\_simulacion](https://github.com/marianaarriz/codigo_simulacion).

A continuación, en las Figuras 18 y 19 se presenta el diagrama de los dos escenarios a simular:

Escenario 0: Sin *hub* (Figura 18).

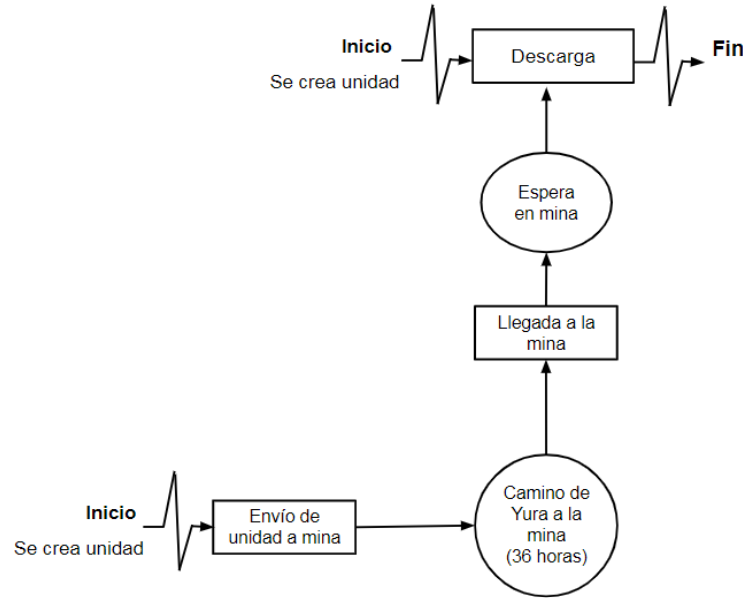


Figura 18. Bosquejo de escenario sin *hub*

Se crea un pedido y la unidad cargada se dirige a mina y llega en un día y medio. Una vez en mina, la unidad debe hacer cola hasta realizar la descarga. Este tiempo de cola está condicionado por el tiempo entre las descargas, variable que funciona como input junto con el tiempo entre pedidos.

Escenario 1: Con *hub* (Figura 19).

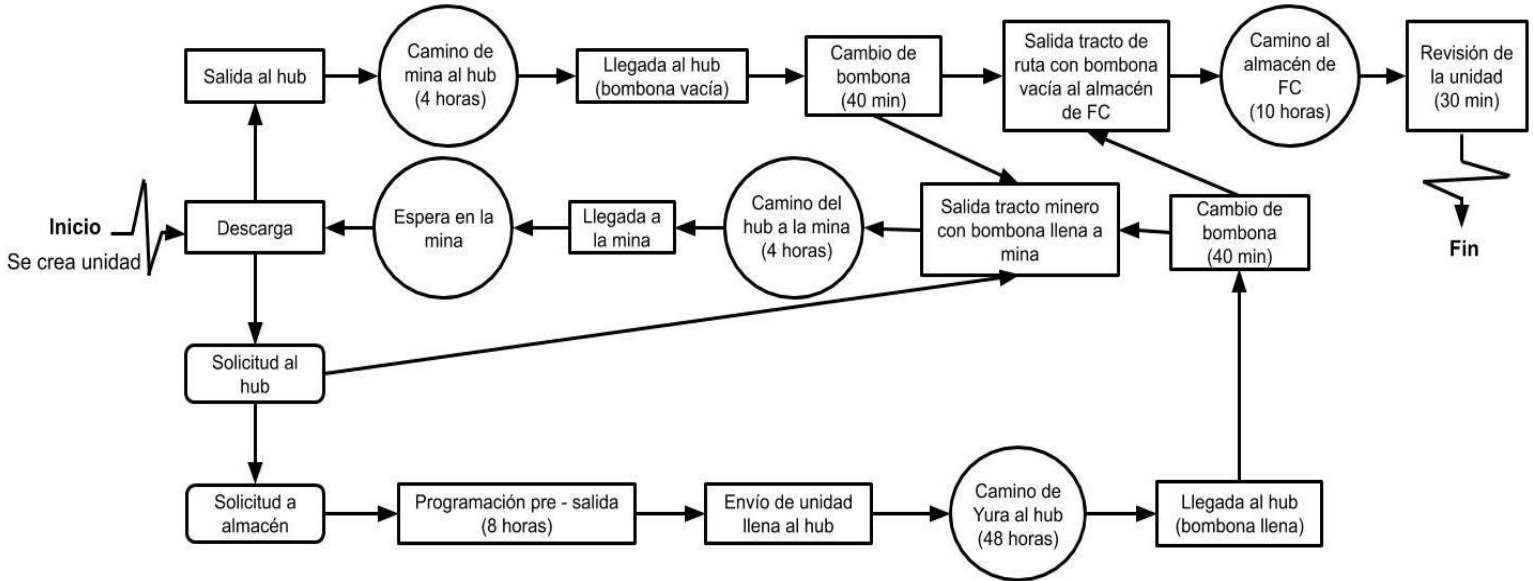


Figura 19. Bosquejo de escenario con *hub*

Una unidad consta de un tracto y una bomba. La bomba es donde se transporta el material, y el tracto es la parte de la unidad que conduce el chofer, que carga la bomba. El tracto puede costar 9 veces lo que cuesta la bomba, por lo tanto el costo de *stand by* va asociado a tener los tractos parados, y no tanto por las bombonas. Entonces, para disminuir los costos de *stand by*, se aplicará el desenganche. Esto quiere decir que el sistema funcionará de la siguiente manera: saldrá una unidad de Yura, y al llegar al *hub* el chofer dejará la bomba llena, pernochará en el *hub* y se llevará una vacía al almacén de FC Transportes; el proceso de desenganche y enganche demora un total de 40 minutos. Serán asignados solamente dos tractos para realizar el transporte del *hub* a la mina y de la mina al *hub*, pues se ha comprobado que no se necesitan más.

Así, la bomba que está en mina será descargada, y luego llevada vacía al *hub*. Los tractos 1 y 2 realizarán el envío de bombonas llenas a la mina, la descarga y el envío de las bombonas vacías de regreso al *hub*; mientras que los otros tractos realizarán únicamente el transporte de Yura al *hub* con la bomba llena y el transporte del *hub* al almacén de FC Transportes con la bomba vacía.



Cuando la bombona es descargada, la unidad completa se dirige al *hub* con la bombona vacía, mientras que el *hub* envía el otro tracto con una bombona llena a la mina, y solicita al almacén una llena para completar su capacidad. Al instante, se inicia la programación pre – salida, que demora 8 horas y abarca diferentes procesos como: ruta a Buenaventura, recojo de guías, ruta al almacén, revisión de la unidad, capacitación y charla en almacén, revisión del *checklist* de la unidad, ruta a Yura y carga en Yura. Paralelamente, la unidad enviada a mina llegará luego de 4 horas, mismo tiempo que demora en llegar la unidad con la bombona vacía al *hub*, que luego de 40 minutos habrá enganchado la siguiente bombona llena y estará esperando lista para salir a mina cuando sea solicitada. Una vez terminada la programación pre – salida, la unidad se dirige al *hub* y llega luego de dos días. Cuando la unidad llega al *hub*, demora 40 minutos en desenganchar la bombona llena y enganchar la bombona vacía que ya está lista para ser retirada. Luego el conductor descansa 8 horas y conduce con la bombona vacía hasta el almacén, donde la unidad será revisada en un tiempo de media hora para asegurar que esta esté lista para el siguiente recorrido.

### **3.4. Análisis y comparación de escenarios**

Los resultados de la simulación fueron mostrados en *dataframes* extraídos en formato csv con las columnas necesarias para corroborar el correcto comportamiento de las unidades en la cadena, y así poder comparar los resultados de ambos escenarios. Además, con el resultado de la simulación se pudo definir la capacidad del *hub* y las políticas que deben ser seguidas para el correcto funcionamiento del modelo de operación.

El resultado indicó lo siguiente:

#### Costo de *stand by*:

Los costos de *stand by* en mina se reducen considerablemente. Dado que se trabaja con desenganche y solo se cobra *stand by* a los tractos, el costo se reduce en un 80%, pasando de ser S/. 122,000.00 en el escenario sin *hub* a S/. 24,500.00 en el escenario con *hub*. El resultado se muestra en la Figura 20.

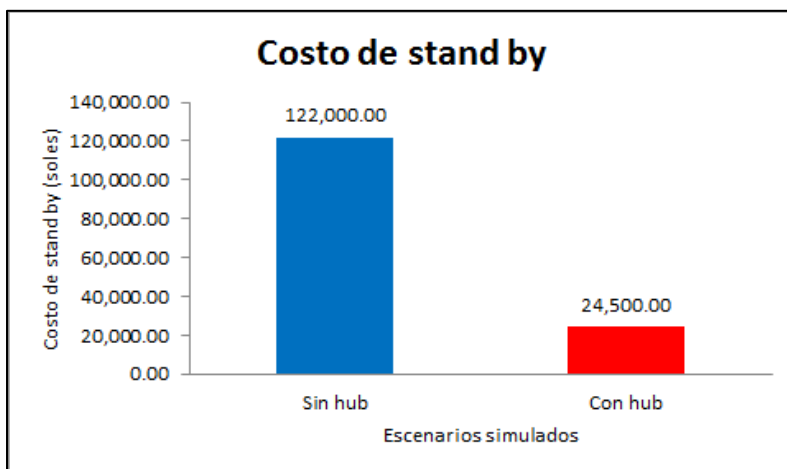


Figura 20. Costos de *stand by*

Tiempo de respuesta:

En el escenario sin *hub* el tiempo de respuesta es de 48 horas, mientras que en el escenario con *hub* el tiempo de respuesta se ve drásticamente reducido a 4 horas, lo cual representa una mejora sustancial para la operación. Además, el transporte ya no se vería afectado por los inconvenientes que puedan ser presentados en la ruta desde Yura. El resultado se muestra en la Figura 21.

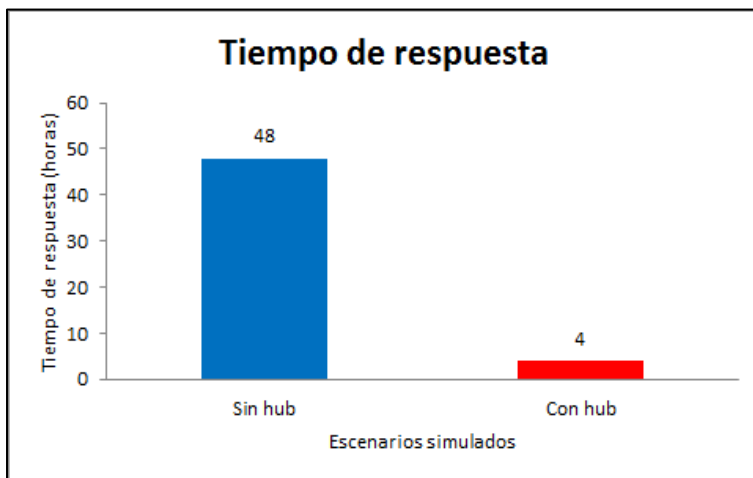


Figura 21. Tiempo de respuesta a mina

### Riesgos asociados a la estadía en mina:

Los riesgos asociados a las unidades y sus operarios dentro de mina se reducen notoriamente. Pasando de ser un promedio de 1087 a 796. El resultado se muestra en la Figura 22. Para calcular estos valores se realizó una matriz AMEF del proceso de descarga de cemento en el silo y se utilizó el NPR más alto (Anexo 2).

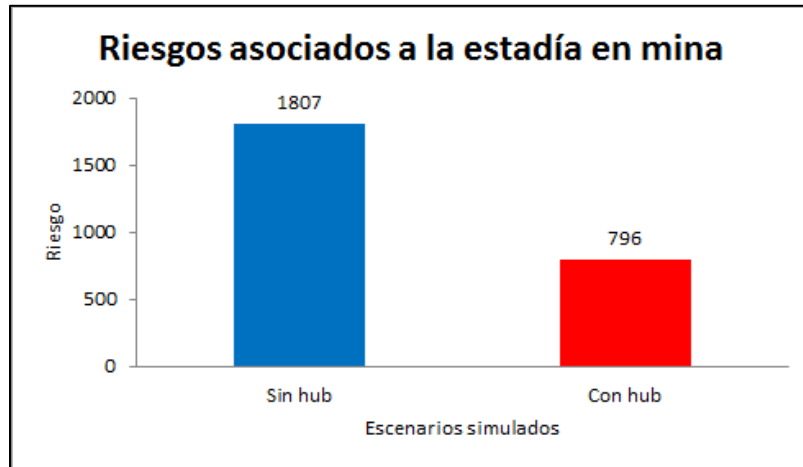


Figura 22. Riesgos por estadía en mina

Cabe resaltar que los choferes no solo se exponen a riesgos dentro de mina sino también en el trayecto. Si bien un *hub* no disminuye los riesgos asociados a la ruta, se realizó una matriz AMEF de la ruta a mina (Anexo 3) para un mejor panorama del nivel de riesgo al que se exponen los choferes en toda la operación.

A continuación se presenta la Tabla 22, que muestra de manera resumida los resultados presentados en las Figuras 19, 20 y 21:

Criterio	Escenario sin <i>hub</i> / AS IS	Escenario con <i>hub</i> / TO BE
Costos de <i>stand by</i> en 6 meses	122,000.00 soles	24,500.00 soles
Tiempo de respuesta	48 horas	4 horas
Riesgos asociados	1807	796

Tabla 24. Resumen de resultados. Elaboración propia.

Los resultados mostraron también que la capacidad del *hub* debe ser como mínimo de 4 bombonas. De ser menos, no se cumple con el requerimiento de mina. Además, en

mina solo debe haber una unidad, y una vez iniciada la descarga se debe solicitar al *hub* la siguiente. No se necesita ninguna unidad más, la cantidad de unidades descargadas será cubierta incluso los días que se descarguen 2 o hasta 3 unidades, pues el tiempo de respuesta del *hub* a mina son solamente 4 horas. Finalmente, la cantidad mínima de tractos que pueden cubrir todo el proceso es 6: dos de ellos para el trayecto *hub* – mina – *hub* y cuatro de ellos para el trayecto almacén – Yura - *hub* – almacén.

### 3.5. Análisis y estimación de costos de inversión y operativos

Finalmente, se realizó la estimación tanto de los costos de inversión (año 0) como los operativos (años 1 a 7), el resultado se presenta en la Tabla 25:

Concepto	Año 0 (soles)	Año 1 (soles)	Año 2 (soles)	Año 3 (soles)	Año 4 (soles)	Año 5 (soles)	Año 6 (soles)	Año 7 (soles)
Infraestructura	10,000	-	-	-	-	-	-	-
Mano de obra	24,000	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000
Equipos	54,000	3,000	3,000	20,000	3,000	3,000	20,000	3,000
Arrendamiento	-	-	-	-	-	-	-	-
Servicios y alimentación	-	33,792	33,792	33,792	33,792	33,792	33,792	33,792
Movimiento de tierras	20,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
Contingencias (10%)	10,800	9,680	9,680	11,380	9,680	9,680	11,380	9,680
<b>Total</b>	<b>208,900</b>	<b>106,472</b>	<b>106,472</b>	<b>125,172</b>	<b>106,472</b>	<b>106,472</b>	<b>125,172</b>	<b>106,472</b>

Tabla 25. Estimación de costos operativos y de inversión

De la tabla presentada, es importante mencionar que los costos relacionados a la inversión inicial son los que se muestran en el año 0, mientras que los costos presentados para los siguientes años se relacionan a los costos operativos. Entrando al análisis detalladamente, para el año 0 (inversión) se consideraron S/.10,000.00 como costos de infraestructura, dado que el local seleccionado solamente requiere de la construcción de un centro de control dentro del mismo, una puerta de entrada y una para la salida de unidades. Se consideran S/.24,000 de mano de obra dado que se estima acabar la construcción en un máximo de seis meses de trabajo, con un equipo de 4 obreros (salario de S/.1,000.00

mensuales). En cuanto a los equipos, se considera S/.54,000.00 entre medios de transporte (2 motos) y un container de respuesta (gata, extintores, fajas, grúa, máquina de soldar, herramientas). Los costos de arrendamiento fueron omitidos dado que el local seleccionado es propio de Buenaventura, así como también fueron omitidos los costos de servicios dado que aún no se iniciaría la operación.

Para los siguientes años (operación del *hub*) se consideraron S/.36,000.00 en costos de mano de obra, entre salarios para 3 personas (un supervisor, un vigilante y un encargado de realizar la limpieza). Se consideraron S/.3,000.00 en depreciación de equipos y S/.17,000 destinados a la compra de repuestos y nuevos equipos. Se ha considerado un costo de S/.33,792 en servicios (S/.2,200 mensuales en agua, luz e internet) y alimentación (S/.7,392, considerando menús de S/.5.50). Se consideró S/.24,000.00 en movimiento de tierras (S/.2,000 por mes), para las reparaciones de vías de ingreso y salida al *hub*.

Finalmente, se ha considerado para todos los años un 10% de los gastos totales en contingencias. Esto para estar cubiertos en caso ocurra alguna eventualidad. A continuación, se presenta el flujo de caja en la Tabla 26, para calcular el tiempo de retorno de la inversión.

	Año 0 (soles)	Año 1 (soles)	Año 2 (soles)	Año 3 (soles)	Año 4 (soles)	Año 5 (soles)	Año 6 (soles)	Año 7 (soles)
Inversión	208,900							
Gastos de operación		106,472	106,472	125,172	106,472	106,472	125,172	106,472
Ganancia	0	195,000	195,000	195,000	195,000	195,000	195,000	195,000
Caja	-208,900	-120,372	-31,844	37,984	126,512	215,040	284,868	373,396

Tabla 26. Flujo de caja de la implementación del *hub*

Los montos presentados demuestran que, dado que el ahorro estimado anual por costos de *stand by* es de S/.106,472, la recuperación de la inversión podría empezar a darse en los siguientes 3 años. Con estos valores, se procedió a calcular los indicadores financieros VAN y TIR, con las respectivas tasas de interés hasta llegar a un VAN = 0. Esto se muestra en la Figura 23.

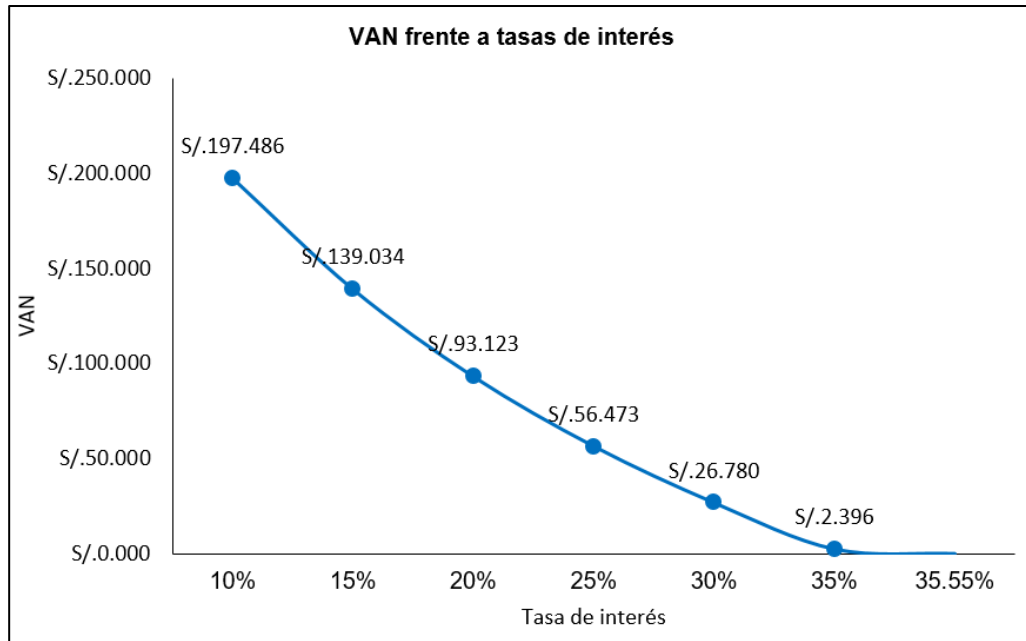


Figura 23. VAN frente a tasas de interés.

El gráfico presentado muestra que en los 7 años evaluados en el flujo de caja, el *hub* logístico es rentable considerando una tasa de interés menor al 35%.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de analizar los resultados de la comparación de escenarios se recomienda implementar el *hub* logístico con las siguientes condiciones:

- Redactar un manual de normas en cuanto al funcionamiento del *hub*. En él se deben definir los roles de cada miembro del equipo trabajando en el *hub* y el correcto procedimiento de cada una de las tareas que se deben realizar. Este manual debe estar alineado a las normas que rigen a la empresa Buenaventura, y debe velar por la seguridad de los trabajadores.
- Políticas a seguir en cuanto al requerimiento:
  - Tener como máximo una unidad dentro de mina. El *hub* solo enviará otra cuando la unidad en mina termine la descarga.
  - El *hub* debe solicitar a Yura una unidad cada vez que envía una a la mina, para completar su capacidad.
- Políticas a seguir dentro del *hub*:
  - La empresa encargada de la gestión y operación del *hub* será FC Transportes
  - El *hub* debe cumplir todas las funciones mencionadas: programación de unidades a mina, gestión y control de requerimientos, control de unidades y supervisión de carga, revisión de documentos de las unidades, respuesta inmediata a accidentes en la ruta a mina, etc
  - Los choferes que van a la mina deben someterse cada semana a pruebas moleculares de COVID-19. No se enviará a mina un chofer que porte el virus.
- Capacidad y dimensionamiento del *hub*:
  - El *hub* debe tener capacidad para almacenar por lo menos 4 unidades, y además del patio de maniobras y el espacio de estacionamiento de las unidades debe considerar ambientes internos como baño, cuarto, zona de recepción de documentos y comedor.

- Localización del *hub*:
  - Para asegurar una respuesta en menos de 4 horas y según el análisis realizado por el método Electre I, el *hub* debe ser ubicado en la provincia de Caylloma, específicamente en un almacén que pertenece a Buenaventura. Como segunda opción se propone trabajar en un caserío a las afueras de la ciudad de Caylloma, a unos 10 Km de la plaza principal, a la altura del desvío a Espinar (ubicación en la Figura 23), que cuenta con un área de más de 950 m<sup>2</sup>.

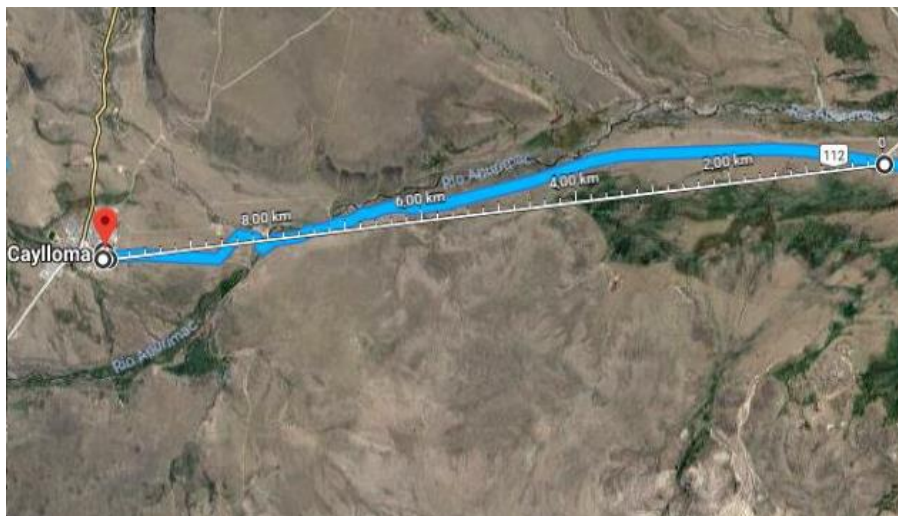


Figura 24. Ubicación satelital del caserío, posible terreno para el *hub*

Además, se sugiere:

- Trabajar con otros suministros y otras minas:

Aprovechar la funcionalidad del *hub* y aplicar este modelo de operación a otros *commodities*. Así, el *hub* podría trabajar con otros suministros además del cemento, como peróxido, cal, petróleo, cianuro, etc. De igual manera, se puede aprovechar la funcionalidad del *hub* y abastecer no solo a Tambomayo sino a otras minas cercanas, como Orcopampa.

Naturalmente, al trabajar con otros insumos y otras minas se necesitará más unidades en la operación, tanto en tránsito al *hub*, a las minas o almacenadas en el *hub*. Por eso, se debe realizar un nuevo dimensionamiento para el *hub* y calcular la



capacidad mínima necesaria para trabajar con las cadenas de suministro que se desee. Así, el *hub* debería tener la capacidad de trabajar con diferentes cadenas de suministro, cada una con diferentes restricciones y demandas independientes.

Teniendo diferentes fuentes de demanda, se podría realizar también un análisis de *risk pooling* para reducir los riesgos entre los participantes (Tambomayo, Orcopampa, Bateas, otras minas aledañas). Además, trabajando con otros insumos y otras minas, los costos de inversión y operación incrementarían naturalmente, y el tiempo de recuperación de la inversión se vería drásticamente reducido, dados los beneficios que la funcionalidad del *hub* traería para las minas involucradas.

– Cantidad de unidades a disponer:

Si bien se demostró que para cubrir la demanda siendo lo más eficiente posible, solo se requiere de 6 unidades: 2 para cubrir el trayecto *hub* – mina – *hub* y 4 para cubrir el trayecto almacén – Yura – *hub* – almacén, se recomienda reservar una unidad extra de la flota como *backup* en caso de emergencia por si hay alguna anomalía en la demanda o si alguno de los tractos sufre algún accidente o siniestro.

– Trabajar con el concentrado:

Así como el *hub* puede ser utilizado para otros insumos, también puede ser utilizado en el proceso inverso, almacenando los camiones de concentrado que salen de mina. Estos podrían llegar al *hub* y pernoctar ahí, para salir el día siguiente al puerto de Matarani o al del Callao.

– Integración del *hub* con la comunidad:

En la operación del *hub* se necesitará gente para cumplir servicios de limpieza, orden, seguridad, etc. Se recomienda contratar a personas de Caylloma y alrededores para cumplir esas labores. Al brindar empleo a la comunidad, el *hub* tendrá mayor aceptación.

– Análisis de la variabilidad de la demanda:

Todos los resultados de la simulación fueron calculados considerando los datos históricos, de los cuales se analizó la variabilidad de la demanda y se determinó una distribución probabilística. Sin embargo, no se consideraron escenarios en los que alguna variable contextual en la operación pueda requerir cantidades aún mayores de cemento. Se podría realizar un análisis de los impactos que podría generar un incremento de la demanda de cemento debido a algunas de estas variables, como política regional y nacional, variación de los costos de minerales (oro, cobre, zinc), aumento en la producción, entre otras variables que puedan afectar al sector minero.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T.Y. Semiglia, "Necesidad de reformar la ley de minería referente a la vulneración de los derechos colectivos y a destrucción de la naturaleza," Tesis de Titulación, Fac. de Derecho, Univ. Nacional de Loja., Loja, Ecuador, 2015. [Online]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/8187>
- [2] N.N. "Instituto de Ingenieros de Minas del Perú-Resultados". iimp.org.pe. <https://iimp.org.pe/mineria-en-el-peru/resultados> (Accessed September 1st, 2019)
- [3] V. Vargas *Actividad minera en el Perú. Definiciones*. Artículo del MINEM (Ministerio de energía y minas), 2014. [Online]. Available: <http://www.ramosdavila.pe/media/Leer-documento-del-MINEM.pdf>
- [4] N.N. *Operación minera Tambomayo*. Buenaventura.com. <https://www.buenaventura.com/es/operaciones/detalle/1> (Accessed September 1st, 2019)
- [5] Empresa Tradelog, "¿Qué es un hub logístico? y ¿Cómo funciona?". tradelog.com. <http://www.tradelog.com.ar/blog/hub-logistico/> (Accessed October 1st, 2019).
- [6] EAE Business School. ¿Cómo es un hub logístico eficiente y qué tener en cuenta en su diseño?. retos-operaciones-logistica.eae.es/. <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/como-es-un-hub-logistico-eficien>. (Accessed October 1st, 2019).
- [7] S. Huber, D. Luft, J. Klaunenberg & C. Thaller. "Integration of transport logistics hubs in freight transport demand modelling". European transport conference, Inc. (2014). [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/31012806.pdf>
- [8] J. Yee. "A Summary and Classification of Logistics Hub Research". Logistics research, Inc. (2013). [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102045>
- [9] J. Figueira, S. Greco & M. Ehrgott. *Multiple criteria decision analysis, state of the art surveys. en Springer Science + Business Media, 2005, Part I-II, pp 3-30.*
- [10] D. Peidro, J. Mula & R. Poler. *Quantitative models for supply chain planning under*

- uncertainty: a review*. Springer, Inc, 2008.
- [11] P. Goodwin & G. Wright. *Decision analysis for management judgement*. Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2004, ch 3,5 and 7, pp 27-70, pp 95-143 and pp 179-215
- [12] B. Efron & R. Tibshirani. *The bootstrap method for assesing statistical accuracy*. Behaviormetrika, 1985.
- [13] J. Ruiz. *Métodos de decisión multicriterio electre y tophis aplicados a la elección de un dispositivo móvil*. Universidad de Sevilla, 2015. ch 3 y 4 pp 24-29, pp 51-63  
[Online] Available:  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5619/fichero/PFC+Jaime+Ruiz+Pallar%C3%A9s.pdf>
- [14] M. Rogers, M. Bruen & L. Maystre. *ELECTRE AND DECISION SUPPORT Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment*. 2000. ch 2 y 3 pp 19-40, pp 45-54
- [15] S. Chęciński. *Simulation analysis of traffic congestion in mineral mining transport. Process Simulation and Optimization in Sustainable Logistics and Manufacturing*. 2014.
- [16] N.N. “¿Qué es simulación?”. paragon.com. <https://www.paragon.com.br/es/academico-2/que-es-simulacion/> (Accessed Jul, 1 2019)
- [17] J.R. Sturgul. *Discrete mine system simulation in the United States. Int J Surf Min Reclam Environ*. 1999
- [18] A. Gutiérrez, C. Rodríguez & A. Santos. “Factores críticos de éxito para la implementación de Business Process Management (BPM): estudio de caso para la cadena de suministro de una empresa del sector floricultor”. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 85-108. 2018
- [19] Python. “*Python packaging user guide*”. python.org. <https://packaging.python.org/> (Accessed Mar, 1 2020)
- [20] *Glosario técnico minero*. República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía.(Agosto, 2003). [Online]. Available:  
<https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>

- [21] D. Lovero. *Historia, procesos, producción y redes metalúrgicas*. Artículo de interés, Facultad de Ingeniería Geológica, Minas, Metalúrgica y Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. [Online]. Available: <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin55/a03.pdf>
- [22] R. Benavides. “Panorama del sector minero” en *La minería responsable y sus aportes al desarrollo del Perú*. Lima: Comunica2, 2 Ed, 2017.
- [23] MINEM. “Perú en el ranking mundial de producción minera” .Lima, Perú, 2017.
- [24] Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA). “ESTRATIFICACIÓN DE LA MINERÍA EN EL PAÍS” in *La realidad de la minería ilegal en países amazónicos*. Lima: Negrapata SAC, 2014. [Online]. Available: <https://saqueada.amazoniasocioambiental.org/La-realidad-de-la-mineria-ilegal-en-paises-amazonicos-SPDA-d891b11c9433fe22ae037fca2a0d7cd5.pdf>
- [25] D. Hoyos, V. Aguinaga, F. Valdivia, D. Ramírez & C. Abanto. “Catastro minero”. *Anuario Minero 2018, Ministerio de Energía y Minas*. Pp. 17. [Online]. Available: [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2018/AM2018\(VF\).pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2018/AM2018(VF).pdf)
- [26] V. Torres. “Producción Ilegal: Una estimación” in *Minería Ilegal e Informal en el Perú: Impacto Socioeconómico*. 2015. CooperAcción N°2, pp. 34 [Online] Available: [http://cooperaccion.org.pe/wp-content/uploads/2015/10/Libro\\_Mineria\\_Ilegal,%20Victor%20Torres%20Cuzcano.pdf](http://cooperaccion.org.pe/wp-content/uploads/2015/10/Libro_Mineria_Ilegal,%20Victor%20Torres%20Cuzcano.pdf)
- [27] H. J. Luna. “Minería subterránea y superficial y beneficio de minerales en el Perú”. Artículo de interés, MINEM. (Marzo, 2011). [Online]. Available: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/PRESENTACIONES/2011/EXPOMINA%20ECUADOR/MINERIA%20SUBTERRANEA%20Y%20SUPERFICIAL%20EN%20EL%20PERU.pdf>
- [28] N.N. Tambomayo, Hidrología, hidrogeología y calidad de agua de la UM Tambomayo (Arequipa). Wes.com. <https://wes.com.pe/project/hidrologia-hidrogeologia-y-calidad-de-agua-de-la-um-tambomayo-arequipa-2/> (Accessed October 1st, 2019)

- [29] O. Peña. "Minas subterráneas en el Perú". Artículo informativo peruano. (2013).
- [30] J. Del Águila. "Concesión minera: ¿Derecho de naturaleza real o habilitación de actividad minera?" Artículo de investigación, CEDEMIN. Fac. de Derecho, Univ. San Martín de Porres., Lima, Perú. [Online]. Available: [https://derecho.usmp.edu.pe/cedemin/revista/explorando\\_veta/concesion\\_minera.pdf](https://derecho.usmp.edu.pe/cedemin/revista/explorando_veta/concesion_minera.pdf)
- [31] M. Canfield. "Etapas del proceso productivo de una mina". Mining course, Grupo antofagasta minerals, SONAMI. (7 de junio del 2012). [Online]. Available: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/04/01.-Etapas-del-Proceso-Productivo-de-una-Mina.pdf>.
- [32] N.N, CCM Consejo de competencias mineras. Proceso de extracción de una mina subterránea. ccm.cl. <https://www.ccm.cl/proceso-extraccion-mina-subterranea/> (Accessed October 1st, 2019)
- [33] C. Briones. "Impacto de accidentes y enfermedades laborales en la empresa minera". 2014. Tesis de Titulación, Fac. de Ingeniería, Univ. Nacional Autónoma, México DF, México, 2014. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4952/Tesis.pdf?sequence=1>
- [34] R. Vásquez. "La teoría de la causalidad de Bird" <https://prevencionar.com/> <https://prevencionar.com/2017/03/27/la-teoria-la-causalidad-frank-bird/>. (Accessed October 1st 2019)
- [35] B. Salazar. "Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF)" [ingenieriaindustrialonline.com](http://ingenieriaindustrialonline.com). <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/>. (Accessed October 1st, 2019).