

PROPUESTA DE GUIA METODOLOGICA PARA LA ESTIMACION Y
CATEGORIZACION DE RECURSOS MINERALES EN YACIMIENTOS
INDUSTRIALES, CON ENFASIS GEOTECNICO, AJUSTADO AL ESTANDAR
COLOMBIANO DE RECURSO Y RESERVAS -ECRR- Y LA LEGISLACION MINERA Y
AMBIENTAL COLOMBIANA



Sofía del Pilar Vides Pedrozo

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS
PROGRAMA DE GEOLOGIA
VILLA DEL ROSARIO NORTE DE SANTANDER

2023

PROPUESTA DE GUIA METODOLOGICA PARA LA ESTIMACION Y
CATEGORIZACION DE RECURSOS MINERALES EN YACIMIENTOS
INDUSTRIALES, CON ENFASIS GEOTECNICO, AJUSTADO AL ESTANDAR
COLOMBIANO DE RECURSO Y RESERVAS -ECRR- Y LA LEGISLACION MINERA Y
AMBIENTAL COLOMBIANA

SOFÍA DEL PILAR VIDES PEDROZO

Trabajo de grado en modalidad; práctica empresarial

Como requisito para optar al título de GEÓLOGA.

Tutor académico

Ilich Sebastián Villamizar Solano

Tutor empresarial

Luis Fernando Cardona

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS
PROGRAMA DE GEOLOGIA
VILLA DEL ROSARIO NORTE DE SANTANDER

2023

AGRADECIMIENTO

Infinita gracias a Dios, a mis padres y mi tía que con su esfuerzo y apoyo he logrado llegar a cumplir cada una de mis metas y sueños, me ha impulsado a seguir con nuevos proyectos que me permita crecer como profesional y como ser humano.

A los profesores del programa de geología de la universidad de pamplona, que, con su conocimiento y sus consejos a lo largo de toda nuestra preparación académica, logrando transmitir una visión integral, apasionada por esta hermosa profesión, a mi docente de bachillerato que inculco el amor por la geología, desde ahí supe lo que quería ser el resto de mi vida.

Al ingeniero Luis Fernando Cardona, por darme su voto de confianza, por creer en mí y permitirme ser parte de su equipo de título minero, en el que pude demostrarme a mí y a la empresa mis capacidades como geóloga. A el geólogo Oscar Arruba quien me guio en todo este proceso del desarrollo del proyecto, a todo el equipo de Gerencia de Materia primas de Cementos argos; título minero, proyecto minero de largo plazo y corto plazo, el equipo de título minero de la planta de rio Claro, gracias por su colaboración, consejos y compañerismo permitieron hacer de esta práctica una gran experiencia laboral.

Agradecida con mi Amiga Maria Paula Cadena por darme en muchas ocasiones el impulso de ser mejor cada día, por orientarme cada vez que me sentía perdida.

Tabla de contenido

1	Resumen	7
2	Introducción	8
3	Objetivos	9
4	Marco teórico	10
4.1	Estimación de recursos minerales	10
4.1	Geoestadística	11
4.2	Variables regionalizadas.....	11
4.3	Análisis de la relación espacial (estructural)	12
4.4	Variografía.....	12
4.5	Método de estimación de recursos minerales	12
4.6	Deslizamientos.....	15
4.7	Taludes	15
5	Metodología	17
6	Resultados	19
6.1	Información general del proyecto	19
6.2	Exploración Geológica de Superficie	21
6.3	Exploración geológica de subsuelo y estudios hidrológicos, hidrogeológico y geotécnico.	29
6.4	Evaluación geológica, modelo geológico y de bloques	40
7	Conclusiones	46
8	Recomendaciones.....	47
9	Referencias	48



INDICES DE FIGURAS

FIGURA 1: METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS DE MINERALES	
INDUSTRIALES	19
FIGURA 2: PUNTO DE CONTROL MATERIALIZADOS, REPRESENTACIÓN DE MOJONES	22
FIGURA 3: ROTULACIÓN DE MUESTRA DE SUPERFICIE	24
FIGURA 4: ID DE MUESTRAS DE SUPERFICIE	25
FIGURA 5: EVALUACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD	26
FIGURA 6: NUMERACIÓN DEL POZO (ID DEL POZO)	30
FIGURA 7: NUMERACIÓN DE CAJA PORTA TESTIGOS	31
FIGURA 8: RECUPERACIÓN DE TESTIGO Y ALMACENAMIENTO EN LA CAJA PORTA TESTIGO	32
FIGURA 9: REGISTRÓ FOTOGRÁFICO DE TESTIGO	33
FIGURA 10: ROTULACIÓN DE MUESTRA DE PERFORACIONES	34
FIGURA 11: REGISTRO DE MUESTRA DE TESTIGO	35
FIGURA 12: HERRAMIENTA DE AUDITORÍA DEL SOFTWARE SURPAC	42

INDICES DE TABLA

TABLA 1: REGISTRO DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	20
TABLA 2: ENSAYOS FÍSICOS, PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS MUESTRAS	26
TABLA 3: ENSAYOS QUÍMICOS PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS MUESTRAS	27
TABLA 4: ENSAYOS FISICO-MECANICOS DE SUELOS Y ROCAS.....	28
TABLA 5: PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO	39



1 Resumen

Este estudio aborda la necesidad de desarrollar una propuesta de una guía metodológica para la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales, con énfasis geotécnico y adaptada al Estándar Colombiano de Recurso y Reservas (ECRR), así como la legislación minera y ambiental colombiana, como resultado de la falta de un enfoque metodológico claro y específico en el estudio geotécnico para proyectos mineros a cielo abierto, lo cual se refleja en la carencia de estándares definidos y guías precisas, comprometiendo la calidad de los informes geotécnicos y la adecuada estimación de recursos minerales según el estándar colombiano de recursos y reservas, en la empresa Cementos Argos S.A. esta propuesta incluye la participación de profesionales del sector minero, ingenieros geotécnicos, geólogos y especialistas en legislación ambiental. No se aplicaron características demográficas específicas, ya que el enfoque se centró en la experiencia y conocimientos técnicos. El método de estudio consistió en la revisión exhaustiva de normativas, evaluación de experiencias previas, diseño de la metodología, y su documentación, con conclusiones que resaltan la importancia de la guía propuesta para optimizar la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales colombianos.

Palabras Claves: Metodología, geología, geotecnia, normativas mineras y ambientales, estimación de minerales, categorización de minerales, yacimientos industriales.

2 Introducción

La industria minera es esencial para el desarrollo económico a nivel nacional, se encuentra ante desafíos en la estimación de recursos minerales, particularmente en yacimientos industriales como los gestionados por Cementos Argos S.A. Este escenario se origina en la carencia de un enfoque metodológico claro en el estudio geotécnico de proyectos mineros, siendo uno del factor modificador en las actividades mineras y por ende en la aprobación del proyecto por las entidades mineras del país y se identifica la necesidad de una Guía Metodológica ajustada al estándar colombiano y la legislación ambiental, con el propósito de potenciar la eficiencia operativa y la toma de decisiones en este ámbito específico. La presente propuesta aspira a mejorar la brecha metodológica existente, ofreciendo un marco detallado para el estudio geológico-geotécnico, la estimación y categorización de recursos minerales sea de un proyecto minero de exploración greenfield o browfield o actualización de estimación y categorización de recursos minerales.

La mejora en la precisión de los informes geotécnicos y la optimización de decisiones estratégicas se perfilan como objetivos fundamentales. Adoptando un enfoque mixto, que incluye revisión de normativas nacionales, evaluación de experiencias previas y diseño metodológico, se espera alcanzar estos objetivos, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la industria minera y optimizando futuras operaciones de exploración, explotación y sostenibilidad de la gestión de recursos minerales en la empresa Cementos Argos S.A.

3 Objetivos

Los objetivos desarrollados en este proyecto son esencial, ya que proporciona una orientación clara y detallada de lo que se quiere lograr, estableciendo metas específicas y definiendo el alcance del proyecto, lo que ayuda a mantener el enfoque y la dirección hacia el logro de los objetivos planteados, divididos en objetivos generales y específico.

General

Elaborar una metodología para la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales, mediante un enfoque geológico-geotécnico, que se ajuste al Estándar Colombiano de Recursos y Reservas -ECRR-, para la empresa Cementos Argos. **Específicos:**

- I. Establecer los parámetros mínimos requeridos por el Estándar Colombiano de Recurso y Reserva, la Legislación Minera Nacional y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).
- II. Evaluar los lineamientos actuales, para la presentación del plan de trabajo y obras (PTO) y reporte de recursos y reservas son las más apropiadas y completa para la estimación, caracterización de recurso mineral y estudio geotécnico.
- III. Establecer las técnicas, métodos y ensayos más favorables para la exploración geológica de superficie, subsuelo y la etapa de evaluación de modelos geológicos.
- IV. Socializar la guía metodológica para la caracterización geotécnica, estimación y categorización de recursos minerales, con el equipo de título minero y de proyectos mineros.

4 Marco teórico

La guía metodológica se describe como un instrumento metodológico que contiene un conjunto de procesos, conceptos, sugerencias e instrucciones para desarrollar de manera eficaz y sostenida diferentes actividades. También hace referencia a algunos principios pedagógicos básicos que pueden ayudar a la toma de decisiones para estructurar determinadas actividades. (Orellano. J, 1998). La guía contiene actividades organizadas de manera secuencial con el objetivo de orientar o conducir determinadas acciones, actividades o procesos, encaminadas al logro de un determinado fin. (Mejía, 2013), Como la estimación y categorización de recursos minerales, para garantizar la precisión, la transparencia y el cumplimiento normativo. (Chaves Mendoza, Patiño Guayacá, & Rodríguez Ruiz, 2022).

La estimación y categorización de recursos minerales es un componente crítico en la industria minera, ya que proporciona la base para la toma de decisiones, la planificación de proyectos y la evaluación de la viabilidad económica de la explotación de yacimientos minerales. Este proceso implica la recopilación, análisis y evaluación de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos para determinar la cantidad, calidad y distribución de los minerales en un yacimiento. Además, estos recursos se clasifican en categorías que reflejan el grado de certeza y confiabilidad de la información disponible. (Comision Colombiana Recursos y Reservas, 2018).

4.1 Estimación de recursos minerales

La estimación tiene como objetivo calcular valores lo más cercanos posibles al valor real, que en general es desconocido, en diferentes puntos de una red. Para lograrlo, se utiliza un estimador llamado krigeaje y otros métodos. El krigeaje se puede aplicar de manera puntual o para estimar bloques de datos, y requiere la consideración de un modelo de continuidad

espacial. Además, se debe definir una vecindad de búsqueda para evitar problemas de interferencia en el proceso de krigeaje. (Arik, 1990). Con esto es posible desarrollar la estimación de recursos naturales permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de estos recursos por medio de la geoestadística.

4.1 Geoestadística

La Geoestadística, según la definición de Matheron (1962), se describe como la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales. Es una rama de la estadística aplicada que se centra en el análisis, modelado y predicción de la variabilidad espacial de fenómenos en Ciencias de la Tierra. La base de la geoestadística radica en la teoría de las Variables Regionalizadas, donde las variables distribuidas espacialmente están correlacionadas, mostrando mayor correlación entre puntos cercanos y menor correlación entre puntos separados. (Caers, 2005).

4.2 Variables regionalizadas

La geoestadística, según Emery (2011), se enfoca en el estudio de fenómenos que se extienden en el espacio y muestran cierta continuidad. Estos fenómenos pueden ser de naturaleza continua, como las leyes minerales, o categórica, como el tipo de roca. La disciplina se centra en comprender y analizar variables regionalizadas que miden propiedades relacionadas con un fenómeno regionalizado, como la ley mineral en geología. La dependencia espacial de estas variables indica que dos leyes minerales cercanas están más correlacionadas, mientras que dos leyes separadas muestran menos relación. Las variables regionalizadas pueden ser de naturaleza continua o categórica. (Henao, 2011)

4.3

Análisis de la relación espacial (estructural)

El análisis estructural, según Caers (2005) y Deutsch (2002), consiste en estimar y modelar la función que describe la correlación espacial de las variables. Es un aspecto fundamental en la geoestadística y se encarga de caracterizar la estructura espacial de un fenómeno regionalizado. En este proceso, se desarrolla un modelo geoestadístico para la función aleatoria estudiada. Para realizar este análisis, es esencial estimar y modelar la función de semivarianzas o semivariograma, como sugiere Davis (2003).

4.4 Variografía

El variograma o semivariograma es una herramienta fundamental en la geoestadística. Permite analizar cómo una variable se comporta espacialmente en un área específica, revelando la influencia de los datos a diferentes distancias. A partir de los datos del variograma, se pueden realizar estimaciones. Según Deutsch (2002), el variograma es la herramienta más importante en la geoestadística. (Rojas, 2011)

4.5 Método de estimación de recursos minerales

La predicción espacial es una técnica que implica estimar valores en lugares donde no tenemos datos directos. Esto se logra mediante el uso de métodos de interpolación o mediante la aplicación de técnicas de simulación condicional. Básicamente, partimos de información conocida sobre una propiedad medida en ciertas ubicaciones y utilizamos esto para predecir los valores en ubicaciones donde no tenemos datos disponibles, generalmente en una estructura de malla 2D o 3D.

En el campo de la geoestadística, se emplea el método de kriging para realizar estas predicciones. Existen diversos tipos de estimación de Recursos minerales, la práctica de la estimación de recursos cubre desde metodologías basadas solo en información estadística

convencional (seccional, polígonos, inverso a la distancia) hasta que aquellas que introducen las características especiales de los datos capturados in-situ, las estimaciones no constituyen determinaciones ni cálculos precisos ya que la información constituye valores esperados. La estimación de recursos se puede dividirse en dos partes: estimación global, estimación local.

Algunos métodos más tradicionales como:

4.5.1 La media aritmética

El método de la media aritmética se basa en lo siguiente: Para estimar la ley media de un conjunto, se promedian las leyes de los datos que están dentro de conjunto. (Método Geoestadístico)

4.5.2 Por polígonos

El método de los polígonos de influencia consiste simplemente en ponderar el valor de la variable en cada punto por el área o volumen de influencia. En tres dimensiones, el procedimiento de cálculo consiste en crear una malla fina de nodos y asignar a cada uno, el valor de la muestra más cercana. De esta manera, se pueden realizar estimaciones tanto globales, como locales. Para realizar con este método una estimación global se requiere tener bien delimitado el campo de estudio. (Chávez, Morocho, & Sánchez, 2018).

4.5.3 Kriging Kriging

El kriging, una técnica de predicción espacial desarrollada por G. Matheron en los años sesenta, se basa en el trabajo pionero de D. G. Krige en correlación espacial. Matheron nombró la técnica en honor a Krige, describiéndola como el Mejor Predictor Lineal Insesgado (B.L.U.P.). Este método, ampliamente utilizado en la industria minera, ofrece ventajas notables, siendo insesgado y minimizando la varianza del error de predicción. El kriging resuelve un sistema de ecuaciones lineales, utilizando valores conocidos del variograma como

media y varianza, mientras que los pesos son parámetros desconocidos. Se basa en suposiciones como la estacionaridad de los datos, asumiendo un comportamiento consistente de la propiedad en todas las ubicaciones del área de estudio sin tendencias inherentes. Esta técnica es aplicable para crear superficies bidimensionales y estimar propiedades tridimensionales mediante variogramas, el kriging es una herramienta valiosa en la estimación de leyes minerales, proporcionando predicciones precisas y eficientes basadas en principios geoestadísticos. (Ramon , 2011)

4.5.3.1 Kriging simple

El enfoque de Kriging Simple se basa en la premisa de que se conoce la ley media de la variable en cuestión. En este método, se calcula un ponderador adicional en función de la ponderación acumulativa de los datos empleados para la estimación. Como resultado, la estimación se acerca significativamente al valor medio cuando hay una escasez de datos disponibles. Este enfoque es especialmente valioso para aproximarse a la ley media en las áreas periféricas del yacimiento y en lugares donde los datos son limitados. (Osorio, 2015)

4.5.3.2 Kriging Ordinario (KO)

En esta variante del kriging, se desconoce la media de la variable. El considerar el valor de la media como desconocido permite generalizar el estimador a situaciones donde esta media no es constante en el espacio: la media puede variar de una región a otra, siempre que sea aproximadamente constante en cada vecindad de kriging. (Muñoz, 2015)

4.5.3.3 Propiedades del Kriging

Las principales propiedades del kriging son: Interpolación exacta: La estimación en un sitio con dato es igual al valor del dato y la varianza de kriging en este sitio es 0, Insesgo: El error de estimación tiene esperanza nula (por construcción), Precisión: El error de estimación tiene

una varianza mínima (por construcción), Aditividad: La estimación de la ley de un bloque es igual al promedio de las estimaciones de las leyes puntuales de este bloque

El objetivo del Kriging es lograr el mínimo error de estimación, los parámetros requeridos para una estimación por Kriging: modelo variográfico, distancia de búsqueda, número de muestras y estrategia de búsqueda, discretización del bloque, tamaño de bloque, estrategia para tratar valores anómalos la estimación por kriging toma en consideración, variabilidad espacial. (Definida por los variogramas). (Muñoz, 2015)

4.6 Deslizamientos

Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, (Brabb y Hrod, 1989). Los movimientos de ladera son responsables de pérdidas socioeconómicas considerablemente mayores de lo que generalmente se reconoce, gran parte de los daños causados no están documentados porque se considera que son el resultado del proceso desencadenante, es decir, parte de una amenaza múltiple (Schuster, 1996)

4.7 Taludes

Un talud o una ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente con un cambio de nivel topográfico (cambios de altura) significativos de manera técnica, la diferencia entre estos es su origen puesto que el talud se forma de manera artificial en cambio la ladera se forma por procesos naturales. (Díaz, 1998)

4.7.1 Elementos de un talud y una ladera.

El talud o ladera está compuesto por distintos elementos los cuales son primordiales identificar para saber ubicar las partes altas donde ocurren los procesos de erosión y las partes inferiores donde suceden principalmente procesos de depositación, según (Suárez Díaz, 1998)

los elementos de taludes y laderas son los siguientes: Altura; La distancia desde la base de un talud o ladera hasta su parte superior. Esta característica es fácilmente identificable en los taludes, pero puede ser más difícil de determinar en laderas menos definidas, Pie; La parte inferior de una ladera donde la pendiente cambia abruptamente,

Cabeza o escarpe; La parte superior de un talud o ladera donde la pendiente cambia abruptamente, Altura del nivel freático; La distancia vertical desde la base de un talud o ladera hasta el nivel en el cual el agua se eleva sobre esta superficie y Pendiente; La inclinación de una ladera, medida en grados, porcentaje o relación m/1, donde “m” es la distancia horizontal correspondiente a una unidad de distancia vertical. Por ejemplo, una pendiente de 45°, 45%.

5 Metodología

La metodología propuesta se estructura en cuatro fases secuenciales, cada una diseñada para cumplir con objetivos específicos que contribuirán al desarrollo de la guía metodológica para la estimación y categorización de recursos minerales con énfasis geotécnico, ajustada al estándar colombiano de recursos y reservas (ECRR), y orientada a los proyectos de exploración minera tipo GreenField de Cementos Argos S.A.

FASE 1: Revisión y Comprensión de Normativas

En esta etapa inicial, se realizará una revisión exhaustiva del Estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR), así como de cualquier normativa interna específica de Cementos Argos relacionada con la estimación y categorización de recursos minerales y estudios de estimación de recursos minerales pétreos, de aseguramientos de calidad y control (QA/QC) y estudios geotécnicos con enfoque a minería de cielo abierto. Esto proporcionará una base sólida y una comprensión clara de los requisitos y estándares que guiarán el desarrollo de la metodología.

FASE 2: Evaluación de Experiencias Previas

Se analizarán experiencias previas en la estimación y categorización de recursos minerales en la industria minera, con énfasis en proyectos similares o específicos de Cementos Argos, así mismo la evaluación de los lineamientos para la presentación de plan de trabajos y obras (PTO) y reporte de recursos y reservas. Esto permitirá identificar mejores prácticas, lecciones aprendidas y posibles áreas de mejora para adaptarlas al enfoque del proyecto estimación y categorización de recurso minerales, en yacimientos industriales, a minería de cielo abierto y no material de arrastre.

FASE 3: Diseño de la Metodología

Esta fase implica la creación de la metodología propiamente dicha. Se llevará a cabo la integración de los requisitos del ECRR y las normativas internas de Cementos Argos, priorizando el enfoque geológico-geotécnico. Se definirán claramente los pasos, procesos y herramientas necesarias para la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales específicos de la empresa, así mismo se realizará varias etapas de validación y ajustes, la metodología diseñada se someterá a un proceso de validación interna. Se buscará la retroalimentación de expertos en geología, geotecnia y otros profesionales involucrados en el proceso de estimación de recursos. Los ajustes necesarios se realizarán para asegurar la viabilidad y eficacia de la metodología propuesta.

FASE 4: Documentación y Socialización

Se documentará la metodología final en un formato claro y accesible, incluyendo manuales de instrucciones y ejemplos prácticos. Se realizará una sesión de socialización interna en Cementos Argos para familiarizar a los equipos involucrados con la nueva metodología y resolver posibles dudas.

Esta metodología propuesta asegura un enfoque integral desde la investigación inicial hasta la implementación práctica, incorporando las especificidades geológicas y geotécnicas necesarias para la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales de Cementos Argos.

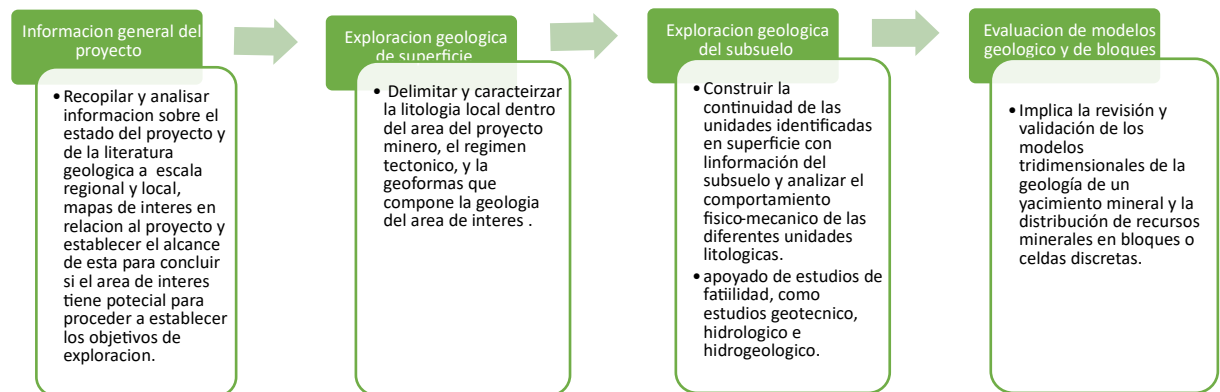
6 Resultados

El proceso de desarrollo de la metodología para la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales, con enfoque geológico-geotécnico y conforme al Estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR) para la empresa Cementos Argos, se estructuró en cuatro fases distintivas. Estas fases fueron concebidas con el propósito fundamental de sentar las bases teóricas necesarias para una futura implementación práctica, aunque hasta el momento, la metodología permanece en un contexto teórico.

1. Información general del proyecto
2. Exploración geológica de superficie
3. Exploración geológica de subsuelo y estudios bases
4. Evaluación geológica, modelo geológico y de Bloques

Figura 1:

Metodología de estimación y categorización de recursos de minerales industriales



6.1 Información general del proyecto

Consiste en describir los aspectos esenciales para el desarrollo de un proyecto de exploración geológica o de estimación y categorización de recursos minerales y de definir

claramente su alcance, aportando directrices para la planificación y ejecución de este dicho proyecto, estableciendo el propósito de la exploración geológica, que conlleva la recolección de datos e información específica para cumplir con el propósito final del proyecto minero que se va a desarrollar.

6.1.1 Descripción del Proyecto

Un proyecto minero inicia con la definición precisa de su alcance, centrado en la revisión bibliográfica como piedra angular. La descripción detallada incluye la localización específica, aspectos geográficos, climáticos y legales del título minero. La revisión bibliográfica, a su vez, se centra en recopilar datos geológicos cruciales de diversas fuentes, estableciendo un conocimiento robusto para guiar la exploración, obteniendo de este proceso una base de dato de registro de información bibliográfica, como se observa en la *Tabla 1*.

Tabla 1: Registro de información bibliográfica

RECOPIACION DE INFORMACION BIBLIOGRAFICA.			
Tipo de Información.	Titulo.	Escala / resolución	Fuente/Autor
Cartografía geológica, memoria y mapa	Mapa geológico Argelia.	1.100.000	SGC, Ingeominas
Imágenes satelitales.	Sentinel 2	Espacial 15 m	USGS
Pluviometría	Estaciones pluviométricas	N/A	IDEAM
POT, EOT	Plan de ordenamiento territorial		Planeación, alcaldías.
Estudio de microzonificación sísmica	Evaluación de la amenaza sísmica en roca para el valle de Aburrá		Integral S.A., Universidad EAFIT y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

POMCA	Formulación del plan de ordenación y manejo de la Cuenca hidrográfica del río cocorná y directos al Magdalena medio entre los ríos la miel y nare		Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño
-------	---	--	-------------------------------------

6.1.2 Recopilación de información bibliográfica.

La revisión bibliográfica en un proyecto minero implica recopilar y evaluar información geológica relevante de diversas fuentes, como mapas, perfiles geológicos, imágenes satelitales y datos hidrológicos. Este proceso permite establecer un conocimiento geológico del área, definir zonas para estudios detallados y planificar estrategias de exploración. La fase concluye con una base de datos bibliográfica detallada y una síntesis de la geología regional, abordando aspectos como estratigrafía y geología estructural.

Los resultados de esta etapa incluyen hallazgos y conclusiones tras el reconocimiento de la zona de interés y el análisis de información secundaria. Estos resultados proporcionan evaluaciones sobre la presencia de indicios geológicos (geomorfología, litología, mineralogía) de posibles yacimientos. Además, ofrecen información crucial para decisiones en fases posteriores del proyecto

6.2 Exploración Geológica de Superficie

Esta fase presenta y recopila las actividades de exploración geológica de superficie realizada, topografía, foto geología, cartografía geológica, geomorfología.

6.2.1 Topografía

La exploración geológica de superficie inicia con trabajos topográficos que van desde la creación de puntos de georreferenciación hasta el procesamiento de datos obtenidos en el campo. Se comienza con la selección de puntos de la red geodésica nacional para la georreferenciación GNSS ver *Figura 2*, identificando su pertenencia a la red del IGAC. La materialización de estos puntos implica la colocación de mojones. El levantamiento topográfico detallado analiza el terreno, considerando sus características físicas y geográficas, generando productos como nubes de puntos, curvas de nivel, modelos digitales de elevación y mapas topográficos a escala 1:1000 en el sistema de coordenadas nacional.

Figura 2:

Punto de control materializados, representación de mojones



Fuente: documento interno de un proyecto de topografía de la empresa

6.2.2 Fotogeología

Se realiza la fotogeología para interpretar aspectos geomorfológicos, hidráulicos y geológicos mediante imágenes aéreas. La fotointerpretación abarca la adquisición de imágenes satelitales o aéreas, su procesamiento digital y la interpretación para obtener un mapa fotogeológico de la zona de interés. Se seleccionan registros de fotografías con atención a la escala, resolución y calidad, incluyendo el uso de drones. El procesamiento digital utiliza técnicas específicas para obtener información relieve, geológica e hidrológica. La

interpretación preliminar identifica aspectos como estratigrafía, litología, rasgos estructurales, geología económica y amenazas naturales. Posteriormente, se verifica la interpretación en campo durante la exploración geológica, seleccionando secciones representativas para un estudio detallado en terreno.

6.2.3 Cartografía geológica

Después de contextualizar el entorno geológico regional con información secundaria, se lleva a cabo la cartografía geológica en el área de interés mediante actividades de campo. Este proceso implica un levantamiento geológico para reconocer, verificar y complementar datos geológicos, caracterizando y cartografiando unidades geológicas, elementos geomorfológicos y estructurales. Se realizan muestreos de rocas y suelos para análisis de laboratorio, asegurando la calidad de los datos obtenidos. El trabajo de campo abarca actividades de control geológico, estratigráfico, estructural y geomorfológico en el área de estudio. Esto incluye la identificación y delimitación de unidades litoestratigráficas, estructuras geológicas, indicadores tectónicos y procesos de inestabilidad de laderas, tanto naturales como antropogénicos, mediante recorridos geográficamente ubicados en el sistema de proyección cartográfico de Origen Único Nacional.

6.2.4 Muestreo

Durante el trabajo geológico de campo, se lleva a cabo la recolección de muestras representativas de unidades litológicas, fundamental para realizar ensayos de laboratorio que analizan la calidad y las características del material destinado a la producción de cemento y agregados. El tipo de muestreo se define detalladamente, especificando el método y la técnica utilizados. Se emplea un muestreo estadístico sistemático con intervalos regulares de espacio, tomando muestras en afloramientos, trincheras o apiques, y utilizando técnicas como muestreo por canales, por puntos o por chip. Para garantizar la calidad del muestreo, se establece un

protocolo que minimiza errores en el proceso. Este protocolo incluye actividades y procedimientos destinados a prevenir problemas que puedan afectar los resultados del trabajo geológico de campo, asegurando la fiabilidad de las operaciones mineras.

Figura 3

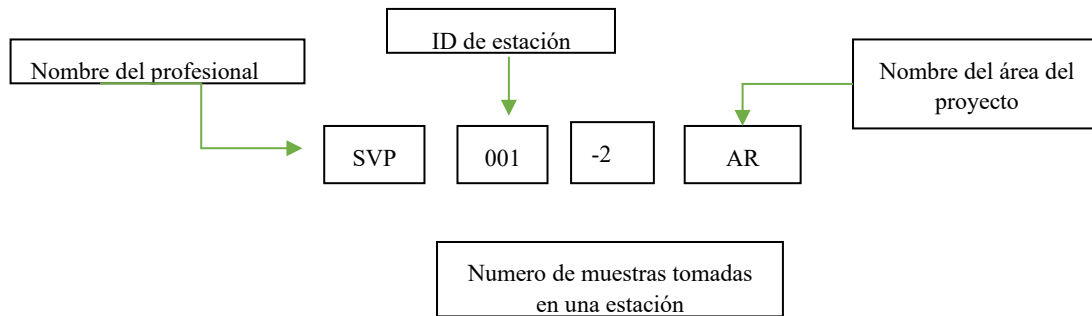
Rotulación de muestra de superficie

	Sistema de control de calidad				Versión	001
	FORMATO DE MUESTRAS DE CAMPO				FECHA:	
PROYECTO:						
ID MUESTRA:						
LOCALIZACION:	X:		Y:		Z:	
UBICACIÓN GEOGRAFICA						
AFLORAMIENTO		TRINCHERAS O APIQUE		OTRO TIPO		
LITOLOGIA:						
ENSAYO O PRUEBA DE LABORATORIO:						
RESPONSABLE DE MUESTREO:						

Identificación y rotulación de la muestra: Se asigna un código único a cada muestra para su identificación, siguiendo un formato específico que incluye iniciales del profesional, número consecutivo y un sufijo con las iniciales del área del proyecto ver **Figura 4**. Cada muestra debe ser etiquetada con información detallada que incluye nombre del proyecto, la fecha de recolección, identificación de la muestra, coordenadas geográficas y sistema de referencia, ver **Figura 3**.

Figura 4

Id de muestras de superficie



6.2.4.1 Muestras de Control de calidad

El control de calidad se centra en evaluar la precisión, exactitud y posibles contaminaciones en los procedimientos de muestreo (ver Figura 5). Se implementa un protocolo de control diseñado para monitorear y corregir errores, asegurando el cumplimiento de estándares de calidad y la aceptabilidad de los datos obtenidos.

El proceso de control de calidad incluye varias muestras específicas:

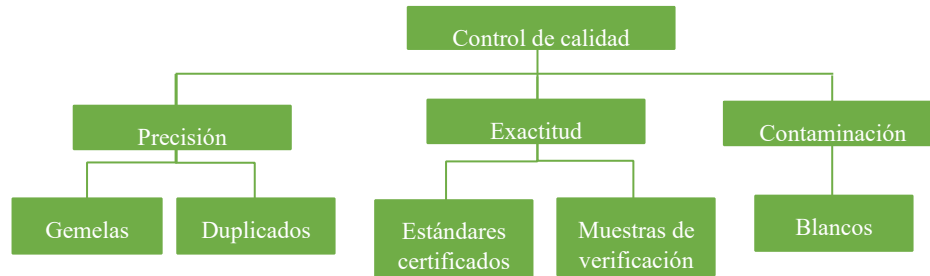
Muestras de control: Se realizan en las etapas de muestreo de superficie y subsuelo e incluyen muestras gemelas, duplicados, muestras blancas y muestras estándar.

Muestra gemela: Consiste en dividir una muestra primaria en dos partes iguales. Ambas se preparan y analizan bajo las mismas condiciones, pero con diferentes identificaciones de muestra, permitiendo evaluar la precisión y exactitud del proceso.

Muestra de duplicado: Se toman dos muestras prácticamente idénticas de un mismo intervalo o sitio para medir la capacidad de repetir consistentemente los resultados, evaluando la calidad del muestreo.

Figura 5

Evaluación de control de calidad



6.2.5 Ensayos

La fase de estudio de calidad del material litológico implica el envío de muestras a un laboratorio certificado para evaluar propiedades físicas, químicas, petrográficas y geotécnicas. Los ensayos se llevan a cabo tanto para muestras de exploración de superficie como de subsuelo.

Ensayos físicos: Incluyen evaluación del desgaste, absorción, solidez en sulfato de sodio, granulometría, realizados en muestras de superficie y testigos de perforación, ver *Tabla 2*

Tabla 2

Ensayos físicos, para el análisis de calidad de las muestras

	Ensayo	Norma
AGREGADO	Granulometría, Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. (suelos y rocas sedimentarias clástica)	NTC 1527.
	Límite del Líquido	INV E 125:2013 (Método A)
	Límite plástico e Índice de Plasticidad	INV E 126:2013
	Densidad (peso unitario) en muestras intactas, alterados, remodelados y reconstituidos (Método Parafinado o por Medidas)	MÉTODO ISRM: 2007. Capítulo 4, Pgs. 83, 86 y 87 de la Traducción Oficial ASTM D 7263:2021

	Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados gruesos mayores de 19 mm, utilizando la Máquina de los Ángeles. Determinación de la resistencia al desgaste de agregados gruesos hasta de 37,5 mm, utilizando la Máquina de los Ángeles.	NTC 93 NTC 98
	Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	NTC 126

Ensayos químicos: Se analiza la composición química de las muestras para compuestos como CaO , CaCO_3 , SiO_2 , Cl , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , SO_3 , Na_2O , entre otros, mediante métodos como la fluorescencia de rayos X y análisis de reactividad potencial alcalisílice, observar la **Tabla 3**.

Tabla 3

Ensayos químicos para el análisis de calidad de las muestras

CEMENTO	Ensayo
	Análisis de óxidos mayores (Fluorescencia de Rayos X)
	Análisis de óxido menores (Fluorescencia de Rayos X)
	Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-sílice
AGREGADO	(método de mortero)

Ensayos físico-mecánicos: Evalúan las condiciones y comportamiento físicomecánico de materiales obtenidos de perforaciones, afloramientos y trincheras. Los ensayos varían según el

análisis y objetivos del proyecto (**Tabla 4**). Los ensayos se centran en los estudios de vías o corredores viales para cumplir con los términos de referencia del Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

Tabla 4

Ensayos físico-mecánicos de suelos y rocas

Ensayos físico-mecánico	
Suelos	Humedad natural
	Granulometría
	Límite de consistencia- límites de Atterberg
	Ensayo de Relación de Soporte de California - CBR
	Corte Directo – CD.
	Ensayo de lugeon y lefranc
Rocas	Corte directo
	Compresión triaxial
	Ensayos de carga puntual
	Ensayos de compresión simple
	Martillo Schmidt
	Ensayo de compresión uniaxial

Petrografía: Implica el análisis y descripción de minerales en las muestras, realizándose a nivel macroscópico y microscópico, tras la preparación de una sección delgada de la muestra.

6.3 Exploración geológica de subsuelo y estudios hidrológicos, hidrogeológicos y geotécnicos.

Este capítulo presenta y recopila las actividades, técnica y métodos de exploración geológica de subsuelo; Geofísica, Perforación, y estudios de factibilidad; estudio hidrológico, hidrogeológico y geotécnico.

6.3.1 Geofísica

Se lleva a cabo una campaña de exploración geofísica para obtener información sobre el subsuelo, incluyendo estratigrafía, profundidad, espesor de capas, localización de fallas, niveles de agua subterránea y estudios en zonas kársticas. Los métodos utilizados incluyen geoeléctricos, sondeos eléctricos verticales, tomografías y métodos sísmicos, seleccionados según los objetivos del proyecto. El proceso consta de tres etapas: adquisición de datos mediante mediciones en campo, procesamiento de datos que implica aplicar algoritmos y técnicas matemáticas, y elaboración de modelos geológico-geofísicos e interpretación de datos. Se representa la estratigrafía y litología de las capas identificadas, generando modelos geofísicos que ayudan a definir zonas de interés para el proyecto y proponer una campaña de perforación. Si el mineral no se encuentra, se considera el cierre del proyecto.

6.3.2 Perforaciones

El proceso posterior a la recopilación de información de exploración geológica y

Estudio geofísico consiste en validar y ejecutar un plan de perforaciones para confirmar la continuidad de las unidades litológicas halladas en superficie, evaluar la calidad del material y mejorar el conocimiento del yacimiento. Esto ayuda en la planificación y desarrollo de la minería de manera efectiva.

El plan de perforación debe ser económico, cumplir con regulaciones mineras y ambientales, así como con las expectativas de la comunidad. Se debe incluir información detallada en las memorias de perforación, como coordenadas, azimuth, inclinación, fechas de inicio y finalización de la perforación, diámetro de la tubería y tipo de perforación, además, se detallan las siguientes fases:

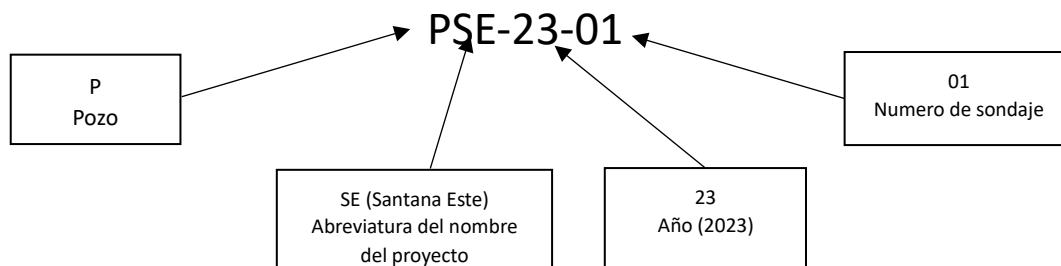
Técnica de perforación: Se establece la técnica de perforación que se utilizará para la exploración geológica y se describen el equipo, las herramientas y el procedimiento a seguir, bajo la supervisión del responsable del proyecto.

Localización de puntos de perforación (Collar): Una vez aprobado el plan, se replantea la ubicación de las plataformas de perforación considerando las anomalías del terreno identificadas en estudios anteriores. Se establecen la numeración de las perforaciones, las coordenadas georreferenciadas, dirección, buzamiento y profundidad de cada pozo.

Numeración del pozo (Id del pozo): Cada pozo se identifica con un número que comienza con P (pozo), seguido de la abreviatura del nombre del área del proyecto, el año y un número específico para la perforación, ver *Figura 6*

Figura 6

Numeración del pozo (Id del pozo)

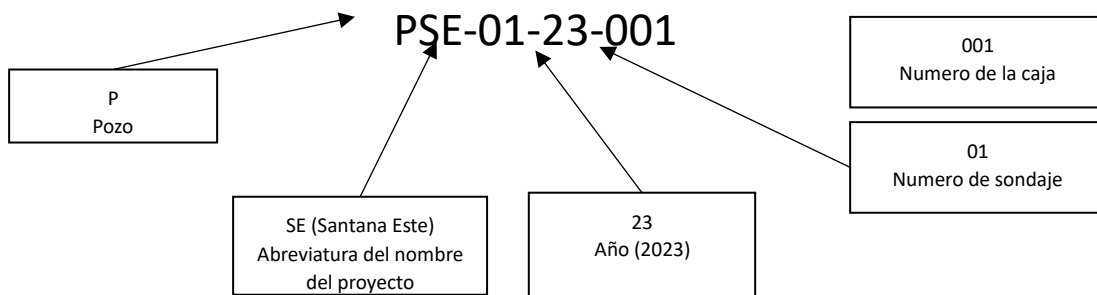


6.3.2.1 Recuperación de testigos

En esta fase, se lleva a cabo la recuperación de los testigos de perforación, los cuales son almacenados en cajas específicas, como se observa en la *Figura 8*. Estas cajas deben tener una codificación que incluya el ID del pozo (*Figura 6*) y el número correspondiente de la caja porta testigos (*Figura 7*). Una vez almacenados, se realiza un registro fotográfico detallado, señalando los datos del pozo, su identificación, la fecha, número de la caja porta testigo y la distancia perforada (*Figura 9-A*). Es esencial indicar la dirección de almacenamiento, la longitud y tener en cuenta la posible pérdida de material.

Figura 7

Numeración de caja porta testigos



La recuperación de testigo se debe realizar de manera ordenada y rigurosa, procurando que la secuencia de rocas obtenida coincida con la realidad de macizo a profundidad, para evitar interpretaciones o reconstrucciones erróneas. Por ende, la supervisión debe ser de manera constante y fotografiar los núcleos de perforación antes de que sean cortado e intervenido por el logueo.

Figura 8

Recuperación de testigo y almacenamiento en la caja porta testigo



Fuente: adaptado de Proceso de muestreo perforaciones Santana Este.

Documento interno de Argos 2023, ejemplo con buena práctica.

6.3.3 Registro de perforaciones (Logueo)

Después de recolectar y almacenar los núcleos de perforación, se procede con un análisis detallado y sistemático de las características de las rocas extraídas. Este proceso implica descripciones cualitativas y cuantitativas de aspectos geológicos y geotécnicos como litología, color, alteraciones, mineralización, estructuras, número de fracturas, porcentaje de recuperación, calidad de la roca (índice RQD), y se complementa con un registro fotográfico de los testigos. Posteriormente, se eligen y marcan los intervalos o tramos que presentan interés para su posterior estudio ver la **Figura 9 -B**.

Figura 9

Registró fotográfico de testigo



Fuente: proyecto de perforaciones de Santana Este

Nota: A: recuperación y almacenamiento de testigos

B: selección de los intervalos de muestreo.

C: corte de los tramos a muestra.

D: muestreo para análisis de laboratorio

6.3.3.1.1 Recuperación del área de perforación

Después de completar la perforación, es fundamental llevar a cabo la restauración del área afectada. Esto implica devolver el suelo a su estado original, retirar todos los equipos utilizados y eliminar cualquier residuo o material extraño del lugar. Los puntos de perforación se marcarán con una placa de cemento que contendrá un tubo PVC conectado en la misma dirección que el sondeo, con la identificación del pozo grabada en el cemento.

6.3.4 Muestreo

En la fase de muestreo, se identifican y cortan los tramos de interés, seguido de la

Toma de muestras (**Figura 9, C - D**) con registro fotográfico de la caja porta testigo antes y después del muestreo. Estas muestras se almacenan en una lona etiquetada y se transportan al laboratorio. Cada lona está marcada con el código de la muestra y lleva un rótulo con información detallada, incluyendo proyecto, tipo de prospección o cartografía geológica, fecha de muestreo, id de muestra y ubicación geográfica (**Figura 10**). Se incluyen muestras de control de calidad, y se realiza un registro fotográfico y una base de datos de registro de

muestreo, que incluye detalles como el objetivo del proyecto, ID del pozo, fecha de envío al laboratorio, tipo de ensayo, ID de la muestra y observaciones como se observa en la **Figura**

11.

Figura 10

Rotulación de muestra de perforaciones

	Sistema de control de calidad				Versió 1		001
	ROTULACION DE MUESTRA DE TESTIGOS				FECHA:		
PROYECTO:							
ID MUESTRA:				ID DE CAJA PORTA			
				TESTIGO			
DESDE				HASTA			
LOCALIZACION:	X:		Y:		Z:		
UBICACIÓN GEOGRAFICA							
ENSAYO O PRUEBA DE LABORATORIO:							
ENCARGADO DE MUESTREO:							

Figura 11

Registro de muestra de testigo

 ARGOS				
REGISTRO DE MUESTRAS DE				
TESTIGO				
Proyecto				Fecha
Id de pozo			Tipo de perforación	
Id de muestra	Ensayo	De	Hasta	Observación
Encargado de muestreo				

6.3.5 Ensayos

La descripción de esta etapa se abordará de la misma forma en la que se encuentra descripta en los ensayos de exploración de superficie.

6.3.6 Estudios

Los siguientes estudios se deben considerar, entre otros, para justificar la razonabilidad de explotación del yacimiento y su categorización, de tal manera que en la cuantificación se excluyan aquellos que estos estudios indiquen que no puede ser aprovechado.

6.3.7 Estudio hidrológico

El estudio hidrológico del proyecto minero comprende la determinación de las características de la cuenca, involucrando la recopilación y procesamiento de datos sobre

precipitación, evaporación, extensión de la cuenca, y volúmenes de agua por escorrentía superficial. Este estudio, conforme a los términos de referencia para estudios de impacto ambiental, se realiza a escala regional y luego se ajusta a escala local para cumplir con la documentación requerida para los PTO. Incluye la delimitación de la cuenca, el cálculo de características morfométricas, y la descripción de la red hidrográfica.

Además, se lleva a cabo un balance hídrico que inicia con la caracterización hidroclimática de la cuenca mediante la investigación de estaciones cercanas, analizando datos de lluvias, temperatura, evaporación y temperatura del suelo. La estimación de caudales implica la evaluación del régimen hidrológico, empleando curvas de duración y diagramas de cajas y bigotes. En ausencia de datos oficiales, se recurre a metodologías de balance a largo plazo.

El inventario de sistemas acuáticos lénticos y lóticos, así como el muestreo de puntos de aguas superficiales, se realiza para identificar, describir y analizar el uso del agua en la cuenca. Este muestreo incluye la caracterización fisicoquímica y bacteriológica de las fuentes hídricas susceptibles a la intervención del proyecto, considerando aspectos como la calidad del agua para consumo humano, industrial, agrícola, pecuario o recreativo. Estos puntos de muestreo se georreferencian y sirven como base para el seguimiento del recurso hídrico durante la construcción y operación del proyecto.

6.3.8 Estudio Hidrogeológico

El estudio hidrogeológico tiene como objetivo analizar el comportamiento del agua subterránea y los acuíferos en el área del proyecto minero. Comprende diversas etapas, comenzando con un inventario de puntos de agua subterránea mediante recorridos de campo para identificar pozos, manantiales y piezómetros. La evaluación de propiedades hidráulicas

incluye ensayos hidráulicos para determinar permeabilidad y coeficiente de almacenamiento en diferentes unidades hidrogeológicas.

La evaluación hidrogeoquímica e isotópica se realiza mediante muestreo de puntos de agua subterránea, monitoreando pH, temperatura, conductividad eléctrica y elementos isotópicos. Se analiza la relación entre aguas lluvias, superficiales y subterráneas. Se lleva a cabo un análisis hidrogeológico que clasifica las unidades hidrogeológicas según su comportamiento litológico y se realiza un modelamiento hidrogeológico conceptual (MHC) que integra datos de diversas disciplinas.

El análisis hidrogeológico identifica cuerpos de agua superficial y su conexión hidráulica con acuíferos, clasificándolos según sistemas de flujo local y regional. Se determinan zonas potenciales de recarga y se crea un MHC que representa las direcciones de flujo, permeabilidad y parámetros fisicoquímicos del acuífero. El MHC sirve como base para un modelo hidrológico numérico que simula el flujo de aguas subterráneas, anticipando cambios por el proyecto minero.

6.3.9 Estudio geotécnico

El estudio geotécnico se realiza con el objeto de caracterizar cuantitativamente los materiales geológicos que soportarán las obras del proyecto y los procesos de inestabilidad identificados en el área en donde se implementarán las actividades del proyecto, con base a la recopilación y análisis de la información obtenida de la exploración de campo, recorridos geológicos, muestras superficiales y muestras recuperadas de las perforaciones. Con la caracterización geotécnica del subsuelo y calidad del material rocoso se le da inicio al análisis de estabilidad y permite conocer las condiciones del material rocoso.

6.3.9.1 Cartografía geotécnica

Con base a la información obtenida en los recorridos previos, (cartografía geológica, geomorfológica y estructural) la interpretación de imágenes satelitales y los estudios de exploración de subsuelo indirectos y directos (mediante la realización sondeos eléctricos verticales SEV y perforaciones mecánicas) y ensayos realizados para conocer el comportamiento físico-mecánico de los suelos y las rocas ver **Tabla 3**.

Con base a toda la información previa, se clasifica las unas unidades geotécnicamente homogéneas, se realiza la caracterización y delimitación las unidades de geotécnicas de suelos y rocas se deberá realizar de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas, como resistencia, deformabilidad, permeabilidad, etc.

6.3.9.2 Mapeo geotécnico del macizo rocoso

Realizar trabajo de campo para evaluar los dos componentes para la caracterización de macizo rocos, la roca intacta y las discontinuidades (juntas, planos de debilidad). Para evaluar la roca intacta se realiza dos métodos por medio ensayos de laboratorio ver **Tabla 3**, y ensayos en campo (Martillo Schmidt), para realizar la evaluación de las discontinuidad sea por medio de mapeo geomecanico por medio del método directo de celdas de detalle, que consiste en una toma directa de datos de los parámetros de caracterización de discontinuidades ver **Tabla 5** y ensayos de resistencia de discontinuidades y/o por medio del logueo geomántico, estos dos se realiza con el mismo objetivo cuantificar la roca.

Tabla 5

Parámetros de caracterización de macizo rocoso

Mapeo geotécnico del macizo rocoso.	
Parámetros de caracterización de macizo rocoso	Tipo de roca
	Tipo de discontinuidad
	Orientación
	RQD
	Espaciado
	Persistencia
	Apertura
	Apertura
	Tipo de relleno
	Grado de meteorización
	Presencia de agua
	Numero de familia de discontinuidades
	Tensiones in situ, naturales o inducidas
Ensayo in-situ	Martillo Schmidt

6.3.9.3 Caracterización Geomecánica del Macizo Rocos:

Se determina cuantitativamente la calidad del macizo rocoso mediante clasificaciones geomecánicas como RMR, Q y/o GSI. Esto permite una zonificación geomecánica para sectorizar zonas geológicas o dominios de calidad de la roca.

6.3.9.4 Elaboración de Modelo Geológico-Geotécnico:

Se definen unidades con comportamientos similares y se asignan propiedades geotécnicas. El modelo geomecánico incorpora parámetros físicos, resistentes y de deformación del macizo rocoso, siendo más representativo cuantos más parámetros se incorporen.

6.3.9.5 Análisis de Estabilidad de Taludes:

Se requiere información topográfica y del modelo geológico-geotécnico para evaluar las condiciones límite de estabilidad en condiciones estáticas, dinámicas y se considera la sismicidad. Se utilizan métodos de elementos finitos y de equilibrio límite para calcular fuerzas y tensiones, obteniendo un modelo de estabilidad de talud y determinando el factor de seguridad.

El estudio geotécnico proporciona análisis de estabilidad, recomendaciones para el diseño de talud y medidas correctoras o de estabilización necesarias. Si el talud no es estable, se consideran medidas de mitigación, modificaciones geométricas o de drenaje. Se presentan resultados numéricos que representan el cálculo del factor de seguridad y se consideran aspectos como la relación coste-seguridad y el grado de riesgo aceptado.

6.4 Evaluación geológica, modelo geológico y de bloques

Después de realizar las etapas de exploración de superficie y subsuelo, se lleva a cabo una evaluación e interpretación de toda la información geológica, geoquímica y geofísica. Esto se realiza dentro de un marco conceptual geológico y minero del yacimiento, estableciendo modelos geológicos. Esta fase es crucial para evaluar un yacimiento mineral, ya que busca determinar la cantidad y calidad de la materia prima presente, considerando la definición de la geometría, características y calidad. El objetivo final es obtener un informe cualitativo y cuantitativo de los recursos del yacimiento.

6.4.1 Base de datos

Después de realizar perforaciones y estudios de factores modificantes del proyecto, como el estudio hidrológico, hidrogeológico y geotécnico, se integra la información obtenida de la exploración geológica. Este proceso abarca perforaciones, logueo geológico y análisis químicos mediante Fluorescencia de Rayos X y análisis de desgaste en la máquina de los ángeles. La información se organiza en bases de datos en Excel y Access, que se dividen en tres categorías principales:

Collar: Contiene información sobre la ubicación (coordenadas), datos de elevación, profundidad y el tipo (muestra, pozo, apique).

Survey: Almacena información topográfica utilizada para calcular los tramos de perforaciones, así como indicaciones y desviaciones del pozo a medida que aumenta su profundidad (azimut, dip y profundidad).

Assay: Contiene información sobre leyes y descripciones mineralógicas de las muestras de testigos de perforación. Incluye la composición porcentual de los contenidos de varios elementos, como CaO, CaCO₃, SiO₂, Cl, Fe₂O₃, Al₂O₃, MgO, SO₃, Na₂O, y el porcentaje de desgaste de la muestra.

Litology o geology: Esta base de datos contiene las descripciones de la geología que atraviesa las perforaciones.

6.4.2 Densidad de la información

Realizar una revisión, análisis de la base de datos y una declaración, si la densidad de los puntos de información, correspondiente a las bases de datos, es suficiente para establecer el grado de calidad necesario y la continuidad geológica, para el procedimiento de estimación y

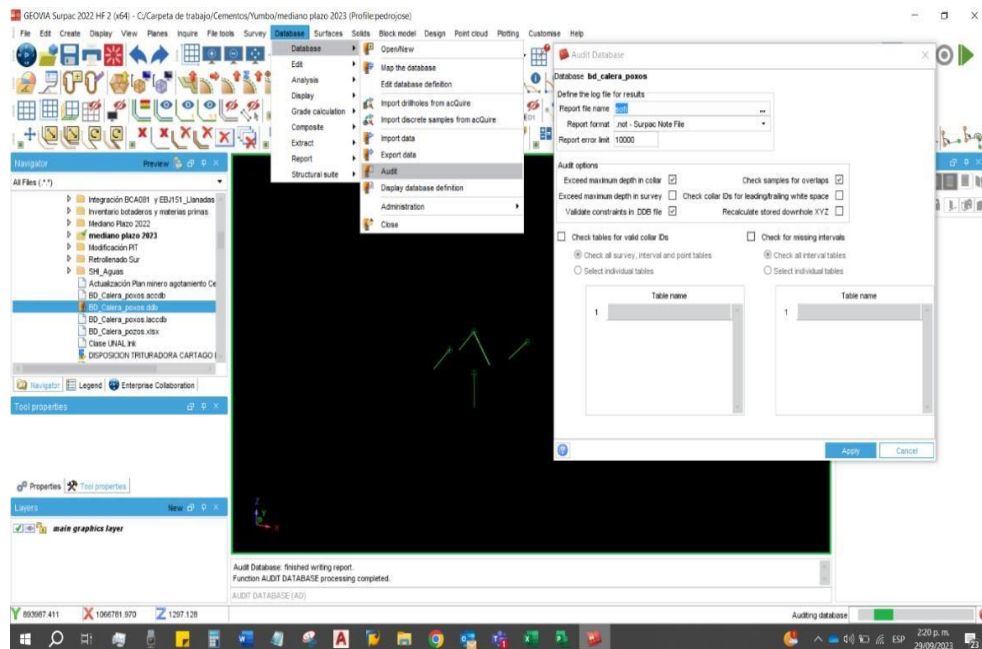
categorización de Recursos Minerales, y si se ha aplicado algún tipo modificación o agregaron datos.

6.4.3 Integridad de la información

Consiste en validar la base dato, chequear la información contenida, verificar contrastando con topografía, sondeos, duplicados, sondeos gemelos que se van a utilizar para realizar el modelo geológico, para asegurarse de que no existan datos erróneos y estos puedan afectar la estimación de recursos mineral, estas validaciones son realizada por medio de herramientas de auditoría que ofrece el software Surpac observar **Figura 12**

Figura 12

Herramienta de auditoría del Software Surpac



6.4.4 Modelo geológico base

Para realizar el modelo geológico se correlacionaron las perforaciones realizadas, consiste en la extracción de los puntos de intercepción de los tramos de las perforaciones con los planos estructurales, creando las zonas de contorno, generando un modelo de la superficie de base

para cada nivel litológico, por medio del software Surpac, combinando la superficie y generación de sólidos.

6.4.5 Análisis exploratorio de los datos (EDA)

Con la información original realizar un análisis estadístico descriptivo para evaluar su tendencia, media, mediana y su distribución, para comprender la distribución (CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ y SiO₂) y variabilidad de los datos, luego de realizar el análisis exploratorio de datos EDA a toda la base de datos, realizando un análisis estadístico básico para identificar características y particularidades en los datos que permitan demostrar si la base de datos se cataloga como homogéneo o heterotópica, los datos analizados se representan en los histogramas y correlaciones para cada variables CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ y SiO₂.

6.4.5.1 Composición de Muestras

Consiste en agrupar cada punto de muestreo en intervalos o subconjuntos llamados “muestras compuestas” o “muestras de composito” con el fin de uniformizar los tramos de muestreo de los datos originales a una longitud de tramo constante, por lo que se hace importante regularizar la longitud de muestreo, esta longitud estará en función a la información de la cual se dispone. Estas muestras compuestas se crean combinando los datos de varios puntos de muestreo cercanos o adyacentes para reducir la variabilidad local y obtener una representación más adecuada para cada elemento CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O (se realiza con la finalidad de obtener leyes más uniformes) realizado a través de histogramas.

6.4.5.2 El estudio variográfico

Realizar la combinación de análisis de datos, conocimiento geológico y técnicas de ajuste de modelos de variograma teórico; esférico para cuantificar la continuidad espacial de las concentraciones para las variables CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O en los intervalos superior,

intermedio e inferior. Permitiendo la relación espacialmente de los valores de concentración de las muestras.

6.4.6 Modelo de bloques

Para realizar el modelo se utilizará el software Surpac, para dimensionar los bloques, el primer paso es crear un conjunto de secciones perforadas a partir de la base de datos de perforación. Estas secciones se usan a continuación para verificar los datos del proyecto y teniendo en cuenta las siguientes variables: la variabilidad del depósito y la geotecnia del depósito, posteriormente, establecer límites geológicos para los diferentes tipos de roca y mineral. El próximo paso es dividir las zonas geológicas en bloques y calcular el tonelaje y la graduación de cada bloque, la forma de los bloques y los métodos de cálculo varían en función de los requisitos específicos del proyecto.

6.4.7 Estimación y categorización de recursos

La estimación de recursos mediante la metodología del kriging ordinario (Ordinary kriging) consiste en interpolar valores de bloques usando kriging con parámetros de un estudio geoestadístico, dicho estudio inicia a partir de una exploración de datos y unas estructuras variográfica y mediante el método de estimación de los recursos por medio del algoritmo del Vecino Cercano (nearest neighbour) que consiste en asignar los valores de la muestra a los cubos más cercanos a ella, bien sea definidos por una esfera o por un elipsoide, este método tiende a dar valores más sesgados a medida que los bloques se alejan de la muestra.

6.4.8 Validación estimación nearest neighbour vs. Ordinary kriging

Se realiza una relación estadística entre el nearest neighbour vs. Ordinary kriging, con el mismo número de muestra para cada uno de los métodos, se realiza una estadística básica del

valor mínimo, valor máximo, media, desviación estándar para cada uno de los métodos, con respecto a las diferentes variables de interés.

6.4.9 Categorización de los recursos.

En el proceso de categorización de recursos del yacimiento se realiza con base a los siguientes métodos de interpolación usado: inverso de la distancia, anisotropía característica de cada dominio, se realiza las estimaciones para cada una de las categorías de recursos de la siguiente manera: medidos, indicados e inferidos.

7 Conclusiones

En conclusión, la implementación de la guía metodológica para la estimación y categorización de recursos minerales en yacimientos industriales, con un enfoque geológicogeotécnico y en conformidad con el Estándar Colombiano de Recurso y Reservas (ECRR), representa una mejora significativa en la precisión de la estimación y categorización de los recursos minerales para la empresa Cementos Argos. Esta mejora permitirá a la empresa optimizar el uso de sus recursos, proporcionando una base sólida para la planificación a largo plazo y la toma de decisiones en proyectos mineros.

Al adoptar una metodología que cumple con el ECRR, la empresa garantiza el cumplimiento con el nivel mínimo requerido para el Reporte Público de Recursos y Reservas. Además, al considerar aspectos geotécnicos en la metodología, se reduce el riesgo de deslizamientos de tierra y colapsos, salvaguardando la seguridad de los trabajadores y la integridad de las instalaciones operativas. Esta integración de enfoques mejora la planificación minera al proporcionar información detallada sobre la calidad y distribución de los recursos en el yacimiento, facilitando la optimización de los procesos de extracción. En resumen, la implementación de esta guía metodológica representa un avance estratégico que beneficia tanto la eficiencia operativa como la gestión integral de los riesgos asociados con las actividades mineras de la empresa.

8 Recomendaciones

El proyecto involucra una Propuesta de una Guía Metodológica para la Estimación y Categorización de Recursos Minerales en Yacimientos Industriales con énfasis Geotécnico, ajustado al Estándar Colombiano de Recurso y Reservas (ECRR) y la legislación minera y ambiental colombiana, se podrían ofrecer las siguientes recomendaciones:

- **Revisión Periódica de la Legislación:** Dado que las regulaciones mineras y ambientales pueden cambiar, es recomendable realizar revisiones periódicas para asegurarse de que la guía metodológica esté siempre actualizada y cumpla con los requisitos legales vigentes.
- **Establecer un Proceso de Revisión Continua:** Dada la dinámica de la industria y las cambiantes condiciones geotécnicas y ambientales, se debería establecer un proceso de revisión continua para que la guía se ajuste a los avances científicos, tecnológicos y normativos.

9 Referencias Bibliográfica

- Armas , E., & Velasco, M. (18 de Junio de 2019). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/413706464/CRISRCO-informe>
- Cementos Argos . (2022). LINEAMIENTO PARA LA PRESENTACIÓN DE PLAN DE TRABAJOS Y OBRAS (PTO). Medellin, Antioquia.
- Cementos Argos. (2020). LINEAMIENTO PARA LA PRESENTACIÓN DE PLAN DE TRABAJOS Y. Medellin, Antioquia.
- Cementos Argos. (Abril de 2023). Guía Metodologica Para El Cierre de minas De la Empresa Cementos Argos . Medellin .
- Chaves Mendoza, M. Á., Patiño Guayacá, J., & Rodríguez Ruiz, C. (2022). Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/2057/Rodr%C3%ADguez%20Ruiz%20Carol%20Andrea-2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chavez, J. C., Morocho , C. A., & Sanchez, H. (2018). Estimación de Recursos Reservas Minerales.
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales . (Mayo de 2018). Agencia Nacional de Minería . Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ecrr_espanol_version_final.pdf
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. (2018). Obtenido de <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/>
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. (2018). Obtenido de <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/>
- Comision Colombiana Recursos y Reservas. (2018). Obtenido de <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reportepublicoresultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>
- Comité Conjunto de Reservas Minerales de Australasia. (2012). Obtenido de <https://www.jorc.org/>
- Gonzalez , L. I. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Madrid.
- Henao , R. (2011). INTRODUCCION A LA. Obtenido de https://geoinnova.org/wpcontent/uploads/2021/08/LIBRO_-DE-_GEOESTADISTICA-RGiraldo.pdf

Hernandez, H. (Agosto de 2018). Obtenido de

<https://nubeminera.cl/wpcontent/uploads/2018/08/CATEGORIZACI%C3%93NDERECU>

R SOSMINERALE

Hounsa, U., & Liu, C. (2018). Analysis of Road Embankment Slope Stability. Open Journal of Civil Engineering, 08(02).

Housner. (1970). Comportamiento sísmico de Taludes.

Melo, C. E. (2012). Obtenido de

https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/101202/CEMM_TESIS.pdf

Metodo Geoestadístico . (s.f.). MÉTODO GEOESTADÍSTICO. Obtenido de <https://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/exploracionminas/wpcontent/uploads/2020/06/APUNTES-Geoestad%C3%ADstica-Unidad-VIII.pdf>

Muñoz, L. A. (2015). USO DE KRIGING UNIVERSAL EN LA SIMULACIÓN CONDICIONAL DE LEYES. Santiago de Chile.

Osorio, J. (2015). Obtenido de

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/53872/8026337.2015.pdf?sequence=&isAllowed=y>

Padilla, J., Houston, W., & Houston, S. (1987). Microcomputer-Aided Evaluation of Earthquake-Induced Permanent Slope Displacements. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Obtenido de Microcomputer-Aided Evaluation of

Rodríguez , L., & Sanhueza , C. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales.

10 ANEXO

- Lineamiento para la presentación de plan de trabajos y obras (PTO) y reporte de recursos y reservas
- Documentos entregables del desarrollo de cada una de las fases, de la guía metodológica para la estimación y categorización de recursos minerales