Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires

CEGM

Carrera de Especialización en Geología Minera

Universidad de Buenos Aires
ARGENTINA

TRABAJO FINAL INTEGRADOR

"La Ye", distrito minero El Bagre, Departamento de Antioquia, Colombia. Revisión de las etapas de un proyecto minero desde la prospección hasta el cierre de mina

Autor: Geol. Jorge Andrés Rubio Chica

Directora: Dra. Ana María Celeda
Codirector: Eliselder Zapata

2025

Departamento de Ciencias Geológicas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

RESUMEN

La mina La Ye es un depósito vetiforme que se encuentra localizado en el municipio de Zaragoza, Antioquia. Su explotación se inició en el año 2010, actualmente se encuentra en etapa de cierre. Durante los años de operación, esta mina subterránea desarrolló siete niveles de explotación (Guías) con una extensión en el sentido del rumbo de 2.2 km y en el sentido del buzamiento de 300 m aproximadamente, con un espesor promedio de veta de 1.15m. La veta La Ye está compuesta principalmente por cuarzo bandeado (70 – 90%), carbonatos (hasta 10%), sericita (5%), pirita como principal sulfuro (1 – 10%), galena (hasta el 5%), calcopirita, molibdenita y telururos de Au-Ag (hasta 1%). Las asociaciones minerales y texturales observadas permiten definir una secuencia paragenética en donde se evidencian al menos dos eventos de mineralización. El primero está constituido por volúmenes significativos de cuarzo, con poco sulfuro (pirita) y cantidades menores de Au. El segundo evento mineralizante está conformado por cantidades escasas de cuarzo, con presencia de sulfuros como: galena, pirita y calcopirita, además de telururos de Ag-Au y Pb como silvanita, hessita y altaita. Se estima que de la mina La Ye se extrajeron entre 180.000 y 220.000 onzas de oro en toda la vida útil del proyecto. Por otro lado, en sus diferentes áreas (exploración, explotación, beneficio, servicios generales, administrativos y servicios técnicos) este proyecto generó empleo formal entre 400 a 600 personas al año de manera directa y entre 500 y 1000 de manera indirecta.

En este trabajo se analiza la información correspondiente de todas las etapas que recorre un proyecto minero durante su desarrollo, desde la prospección hasta el eventual cierre de la mina cuando las reservas se agoten.

Palabras claves: Depósito vetiforme, Mina La Ye, análisis estructural, oro

ABSTRACT

La Ye mine is a vein deposit located in the Municipality of Zaragoza, Antioquia that has been exploited since 2010 and currently is in the closure stage. During the years of operation, this underground mine developed seven exploitation levels with an extension in the strike direction of 2.2 km and in direction of dip approximately 300 m, with an average vein thickness of 1.15m. La Ye vein is mainly composed of banded quartz (70 – 90%), carbonates (up to 10%), sericite (5%), pyrite as the main sulfide (1 – 10%), galena (up to 5%), chalcopyrite , molybdenite and Au-Ag tellurides (up to 1%). The mineral and textural associations observed define a paragenetic sequence where at least two mineralization events are evidenced. The first, constituted by significant volumes of quartz, with little sulfide (pyrite) and minor amounts of Au, and the second, by small amounts of quartz, with presence of sulfides such as: galena, pyrite and chalcopyrite, as well as Ag-Au and Pb tellurides such as silvanite, hessite and altaite. It is estimated that between 180,000 and 220,000 ounces of gold were extracted from La Ye mine throughout the project lifespan. On the other hand, this project in its different areas (exploration, exploitation, ore tratment, administrative and technical services) has generated direct formal employment to 400 to 600 people and between 500 and 1000 people indirectly employed every year.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN 6
2. OBJETIVOS 8
3. MATERIALES Y MÉTODOS 8
4. ANTECEDENTES 9
4.1. Antecedentes de exploración de la veta La Ye 9
4.2. Antecedentes bibliográficos y académicos 10
5. LOCALIZACIÓN 11
6. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL DEPÓSITO VETIFORME LA YE 11
6.1. Geología Regional 11
6.2. Geología Local 14
6.3. Características mineralógicas y petrográficas de la veta La Ye 16
6.4. Metalografía de la veta La Ye 19
6.5. Geología estructural 24
7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL DEPÓSITO LA YE 26
7.1. Análisis estructural de la veta La Ye 26
7.2. Análisis estructural de las fallas mayores 27
7.3. Análisis estructural de las fallas menores 28
8. DISEÑO DE MINA, MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO 30
8.1. Diseño de mina 31
8.2. Métodos de explotación 35
8.3. Beneficio y transformación del mineral 40
9. ASPECTOS FINANCIEROS, SOCIALES Y AMBIENTALES 44
9.1. Entorno económico. Perspectivas de la economía en Colombia relacionadas con el proyecto La Ye 44
9.2. Análisis financiero del proyecto La Ye 46
9.3. Aspectos ambientales 48
9.4. Aspectos sociales 55
9.5. Impacto social de proyecto minero La Ye 59
10. PLAN DE CIERRE DE LA EXPLOTACIÓN Y ABANDONO DE LOS MONTAJES Y DE LA INFRAESTRUCTURA 59
10.1. Plan de obras de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal del sistema alterado 60
11. CONCLUSIONES 61

BIBLIOGRAFÍA 61

Índice de figuras

Fig. 1. Cartografía geológica y localización del depósito vetiforme de La Ye (elipse de color rojo) y de las principales manifestaciones estructurales asociadas. Tomado y modificado de Naranjo-Sierra, et al. 2016. 7
Fig. 2. Ruta metodológica para la elaboración del presente TFI. 9
Fig. 3. Contexto geológico regional del depósito vetiforme de La Ye. **A.** Ubicación del departamento de Antioquia. **B.** Localización del Plutón de El Carmen (recuadro rojo), cuerpo hospedante de la estructura vetiforme de La Ye. Tomado de Zapata-Cardona et al. (2023). 13
Fig. 4. Características de la veta La Ye. **A**. Dimensiones de la veta La Ye en un panel de explotación. **B.** Muestra de veta con contenido de cuarzo (Qz), y sericita (Ser), pirita y galena (tomado de Castro-Lotero, 2015). **C.** Veta La Ye en contacto neto con la roca caja (tonalita del Plutón de El Carmen). **D.** banda de pirita y galena interdigitadas con cuarzo bandeado. 15
Fig. 5. Características de las rocas encajantes de la veta La Ye. **A.** Cuerpo tonalítico presente en la mina La Ye. **B.** Cuerpo tonalítico - granodiorítico observado en la mina La Ye (tomado de Zapata-Cardona et al., 2023). **C.** Textura milonítica sobre la roca caja de la veta La Ye en detalle. **D.** Textura milonítica desarrollada sobre cuarzodiorita (Tomado de Naranjo-Sierra, 2019). 16
Fig. 6. Características petrográficas de la veta La Ye. **A.B**. muestra en sección delgada – pulida de la veta para mina La Ye, con una mineralogía de cuarzo (Qz) + sericita (Ser) + pirita (Py) +/- clorita (Cl), definiendo una alteración fílica. 10x_Nll_Nx_LT (tomado de Castro-Lotero, 2015). 17
Fig. 7. Textura de cuarzo de la veta La Ye. **A**. Textura masiva, granos de cuarzo (Qz) en contacto neto de formas y tamaños regulares. 10x_Nx_LT. **B**. Textura Comb o en peine se ven granos de cuarzo (Qz) con formas de diente, creciendo perpendicular a una fractura que está siendo rellenada por carbonato (Ca) y sericita (Ser), 5x_NX_LT. **C.** Textura en mosaico, granos de cuarzo (Qz) de formas anhedrales en contacto irregular, se caracteriza por ser una textura de recristalización, 5x_Nx_LT. **D.** Primeros inicios de recristalización del cuarzo (Qz) definido como un BGL, encontrando texturas de "Bulging Quartz, 50x_Nx_LT. Las imágenes y los pies de página fueron tomados y modificados de Castro-Lotero, 2015. 18
Fig. 8. Pirita y galena en secciones delgadas pulidas 10x_Nll_LR. **A**. Galena rellenando fracturas a lo largo de cristales de Py. **B.** Galena intercrecida con Pirita (Py: pirita, Gn: galena, Qz: cuarzo) 19
Fig. 9. Galena y calcopirita rellenando fractura a lo largo de un cristal de Pirita. 10x_Nll_LR. (Py: pirita, Gn: galena, Cpy: calcopirita). 20
Fig. 10. Altaita intercrecida con galena y Pirita. 10x_Nll_LR. (Py: pirita, Gn: galena, At: altaita). 20
Fig. 11. A. Hessita (Hs) en microfracturas de pirita (Py) asociada a galena (Ga), 20x_Nll_LR. **B.** Grano de hessita (Hs) de forma subhedral en pirita (Py), asociada a galena (Ga) y calcopirita (Cpy), 20x_Nll_LR. Las imágenes y los pies de página fueron tomados y modificados de Castro-Lotero, 2015. 21
Fig. 12. A. Silvanita (Sv) asociada a galena (Ga), de forma subhedral, 20x_Nll_LR. **B.** cristal de silvanita (Sv) en contacto con galena (Ga) y calcopirita (Cpy), se caracteriza por su forma subhedral, 10x_Nll_LR. (tomado y modificado de Castro-Lotero, 2015). 21
Fig. 13. Presentación del de Au en la veta La Ye**. A.** Grano de oro libre (Au) asociado a cuarzo (Qz) y pirita (Py) definiendo un evento temprano de mineralización, 20x_Nll_LR. **B.** Granos de oro (Au) dentro de microfracturas de pirita (Py) asociado a galena (Ga), calcopirita (Cpy), definiendo un segundo evento mineralizante. 10x_Nll_LR. **C.** Oro electrum (Au), asociado a

galena (Ga) se encuentra dentro de microfracturas de pirita (Py), 20x_Nll_LR. **D.** Grano de oro electrum (Au) asociado a galena (Ga) dentro de microfracturas de pirita (Py), 20x_Nll_LR. (tomado de Castro-Lotero, 2015). 22
Fig. 14. Histograma de tamaños de granos vs la frecuencia. 23
Fig. 15. Secuencia paragenética propuesta para la veta La Ye, en donde se evidencian al menos dos eventos mineralizantes principales. (tomado de Naranjo-Sierra et al., 2016). 24
Fig. 16. Esquema del modelo estructural presentando los 3 principales eventos de deformación que afectaron y controlaron la mineralización de la veta La Ye. Tomado de Naranjo-Sierra et al., 2016. 25
Fig. 17. Mapa en planta y en perfil de la mina La Ye, donde se muestran las principales fallas mayores del sistema estructural. 26
Fig. 18. Diagrama de polos para los datos de la veta. 27
Fig. 19. Diagrama de rosa de rumbo y buzamiento para datos de la veta La Ye. 27
Fig. 20. Diagrama de polos para los datos de las fallas mayores. 28
Fig. 21. Diagrama de rosa de rumbo y buzamiento para datos de los datos de las fallas mayores. 28
Fig. 22. Diagrama de polos para los datos de las fallas menores. 29
Fig. 23. Diagrama de rosas de rumbo y buzamiento para datos de los datos de las fallas menores. 29
Fig. 24. Panorámica Planta de Beneficio Mina La Ye. 30
Fig. 25. Sección tranversal de una guía mineral. 31
Fig. 26. Sección geométrica de una cruzada. 32
Fig. 27. Secciones geométricas de una guía, menor a 0.5m. 32
Fig. 28. Secciones geométricas de una guía, entre 0.5 m. y 1.1 m. 33
Fig. 29. Sección típica de una sobreguía. 33
Fig. 30. Vista en planta y perfil de una sección típica de un tambor o chimenea. 34
Fig. 31. Vista en perfil de la sección de un inclinado. 34
Fig. 32. Vista en sección longitudinal de un panel de explotación de dos flancos. 35
Fig. 33. Esquema del método de explotación de corte descendente utilizado en la mina La Ye. 35
Fig. 34. Primera etapa del ciclo de explotación del método de corte y relleno hidráulico. (Perforación y voladura del techo). 36
Fig. 35. Segunda etapa del ciclo de explotación del método de corte y relleno hidráulico. (Extracción del mineral, descargue). 37
Fig. 36. Tercera etapa del ciclo de explotación del método de corte y relleno hidráulico. (Construcción de tabiques o muros impermeabilizados y relleno con arenas). 37
Fig. 37. Primera etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Preparación del bloque, construcción de tolvas e inicio de los ciclos de perforación y voladura). 38
Fig. 38. Segunda etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Se llega hasta el final de la altura del bloque con el mineral arrancado en el piso, se construyen los tambores que comuniquen con el nivel superior para el futuro descargue del estéril). 38
Fig. 39. Tercera etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Extracción del mineral arrancado). 38
Fig. 40. Tercera etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Clausura de las tolvas de descargue y relleno con estéril del espacio vacío). 39
Fig. 41. Etapas del proceso de explotación empleadas según la metodología de Cámaras y Pilares. 40

Fig. 42. Diagrama de flujo proceso de beneficio del oro. 43
Fig. 43 Bosque con baja intervención 51
Fig. 44 Bosque con alta intervención 51
Fig. 45 Zonas Minería 51

Índice de tablas

Tabla 1 producción de oro en Colombia (en MT/a) 44
Tabla 2 Participación de La Ye en la producción nacional de oro 45
Tabla 3 . Exportaciones de oro de Colombia 2010 y 2011. Tomada de DANE.gov.co. 46
Tabla 4. Estimación de recursos y reservas para la mina La Ye en el año 2010. 47
Tabla 5 Parámetros de evaluación para la viabilidad del proyecto La Ye en el año 2010. 47
Tabla 6 Parámetros de evaluación para la viabilidad del proyecto La Ye en el año 2010. 50
Tabla 7 Impactos identificados e importancia ambiental 52
Tabla 8. Programas de manejo para los impactos ambientales del proyecto La Ye. 53
Tabla 9 Población de los municipios del área de influencia indirecta, Censos DANE. 56
Tabla 10. Distribución de predios en los municipios del área de influencia. 57

1. INTRODUCCIÓN

Un proyecto minero debe recorrer una serie de etapas en su desarrollo, desde la localización de zonas que presenten potencial para poseer concentraciones anómalas de elementos económicos, su posterior exploración y estimación de la cantidad de material en el subsuelo, juntamente con el análisis de métodos de extracción de los minerales y elementos de la manera más eficiente. Posteriormente se deben efectuar los análisis de información de mercado, los aspectos jurídicos, ambientales, sociales y financieros en los cuales se enmarcaría el proyecto, hasta el eventual cierre de la mina cuando las reservas se agoten.

En este trabajo se ejemplificarán estas etapas mediante el análisis de la información existente sobre el distrito minero El Bagre, específicamente sobre el proyecto minero **La Ye**, que se localiza en el noreste del departamento de Antioquia entre los municipios de El Bagre y Zaragoza, ubicado en la Cordillera Central de Colombia y que ha sido reconocido como un importante distrito de explotación de oro aluvial y mineralizaciones de tipo vetiforme (Shaw, 2000; Sillitoe, 2008; Londoño *et al.,* 2009; Naranjo-Sierra *et al.,* 2016).

El depósito metálico de La Ye es un depósito vetiforme de Au-Ag de edad pérmica encajado en una zona de cizalla que se encuentra hospedado en rocas plutónicas carboníferas relacionadas con el Plutón de El Carmen, cuerpo ígneo que hospeda estructuras adicionales a la relacionada con la veta La Ye, como la veta Los Mangos y la Veta Cordero (estructuras con robustos trabajos de exploración) y demás estructuras que componen el distrito del Bagre y que han sido explotadas principalmente por trabajos mineros subterráneos artesanales que posteriormente han permitido el desarrollo de *targets* de exploración (Leal-Mejia, 2011; Naranjo-Sierra *et al*., 2016; Naranjo-Sierra, 2021; Zapata-Cardona et al., 2023). Las estructuras vetiformes del distrito El Bagre están dominadas composicionalmente por cuarzo y en menor proporción calcita, sericita, clorita, pirita, sulfuros de metales base (Pb, Cu, Zn), oro y telururos de Au-Ag y Pb.

Las estructuras vetiformes principales del distrito El Bagre presentan un marcado control estructural dominados por tendencias N-S principalmente y buzamientos que varían entre 40° a vertical con variaciones tanto al E como al O y que, para la estructura de La Ye se encuentran principalmente al oeste (Fig. 1).

La veta La Ye ha sido explotada por la empresa Operadora Minera S.A.S. desde el año 2010 hasta la actualidad, es importante mencionar que la empresa Mineros S.A fue la dueña en 100% de la empresa Operadora Minera hasta el año 2020 y al día de hoy se encuentra en etapa de cierre. Durante los años de operación, esta mina subterránea desarrolló siete niveles de explotación (Guías) con una extensión en el sentido del rumbo de 2.2 km y en el sentido del buzamiento de 300 m aproximadamente, con un espesor promedio de veta de 1.15 m. (Naranjo-Sierra, *et al.* 2016, Naranjo-Sierra, 2021)

Con base en todo el contexto mencionado, este trabajo tiene como objetivo recopilar y analizar toda la información geológica (litológica, mineralógica, petrográfica y metalográfica) existente para esta estructura vetiforme, además de efectuar un análisis de los datos estructurales tanto de las vetas como de las principales fallas que limitan y modifican espacialmente a esta estructura. En particular, efectúa un análisis estructural que contribuirá con el conocimiento de las manifestaciones vetiformes relacionadas con el distrito minero de El Bagre-Zaragoza y que

brindará herramientas para futuras campañas de exploración que se realicen en este sector, permitiendo la optimización y la focalización de los recursos en zonas con mayores posibilidades de contener un depósito mineral.

Adicionalmente se mencionan los principales procesos de extracción y beneficio y las tareas del cierre de mina relacionadas con el proyecto minero La Ye Para abordar de una manera integral el ciclo minero se mencionan los aspectos principales de los componentes ambientales, sociales y económicos que enmarcaron su desarrollo.

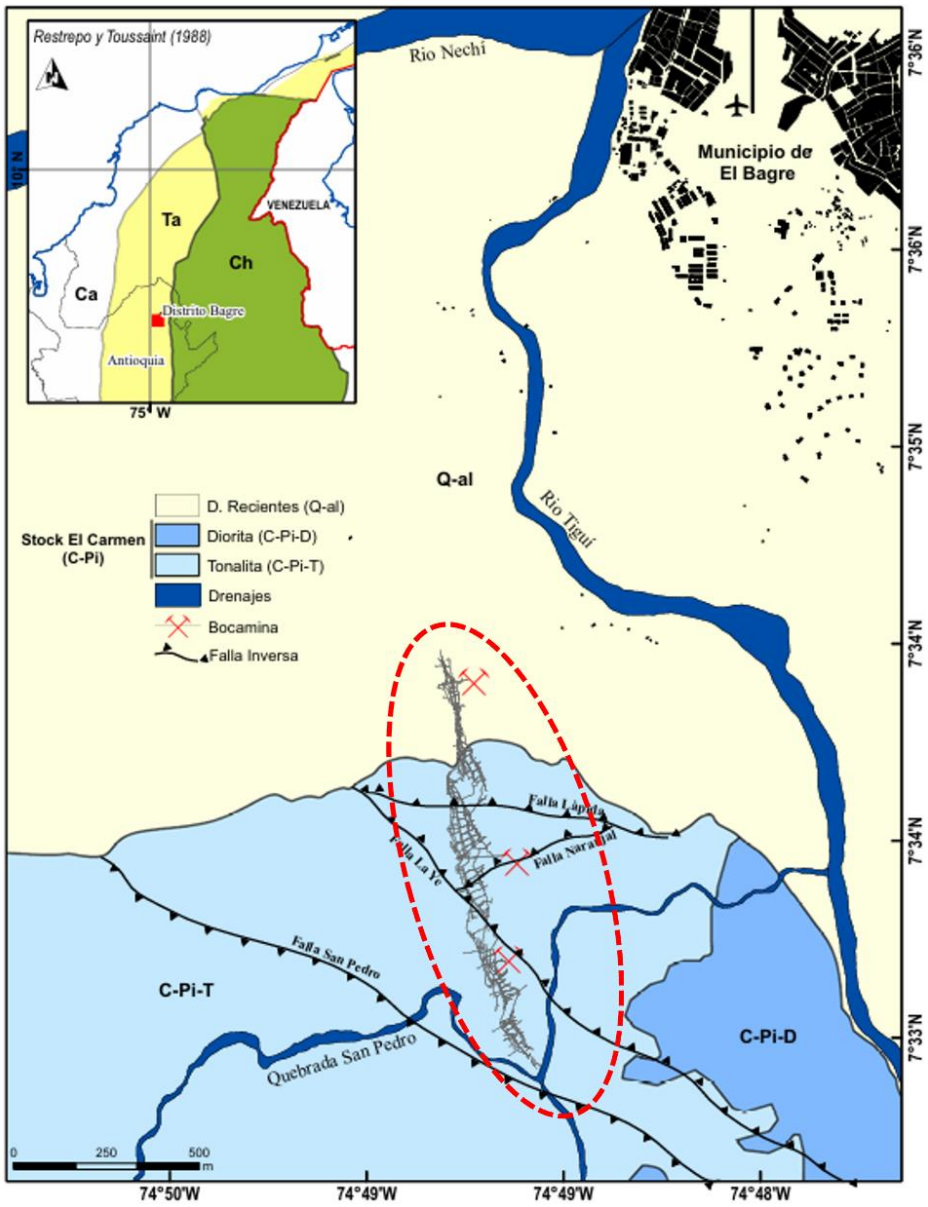

Fig. 1. Cartografía geológica y localización del depósito vetiforme de La Ye (elipse de color rojo) y de las principales manifestaciones estructurales asociadas. Tomado y modificado de Naranjo-Sierra, *et al*. 2016.

2. OBJETIVOS

Los objetivos planteados para el desarrollo del presente trabajo son los siguientes:

- ✓ Realizar una recopilación y caracterización geológica (litológica, mineralógica, petrográfica y metalográfica) del depósito vetiforme de la mina La Ye a partir de los datos existentes.

- ✓ Efectuar un análisis estructural de los datos de la veta y las principales estructuras mayores (fallas primarias y secundarias) relacionadas con la disposición espacial de esta veta.

- ✓ Detallar las principales características de los procesos de explotación, extracción y beneficio de la estructura La Ye.

- ✓ Resumir las tareas de la etapa de cierre de mina que se llevan/llevarán a cabo.

- ✓ Aportar datos sobre la importancia comercial y social que tuvo durante estos 15 años la explotación de Au de la mina La Ye.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La información con la que se desarrolló este trabajo fue extraída de artículos científicos, reportes públicos e informes compartidos por la empresa Operadora Minera S.A.S., además de reportes académicos con fines de investigación, y varias tesis de pregrado que se han generado en torno a este depósito mineral.

Para dar desarrollo al presente TFI (Trabajo Final Integrado) se diseñó la siguiente ruta metodológica (Fig. 2):

1. Inicialmente se realizó un compendio de la información bibliográfica existente desde los componentes geológicos, litológicos, cartográficos y estructurales existentes en torno a la veta La Ye y el distrito minero de El Bagre.
2. Los datos estructurales que se utilizaron para realizar los análisis estructurales de las vetas y las principales fallas fueron tomados por los geólogos que han trabajado en este depósito vetiforme a lo largo de las etapas de exploración y explotación, los cuales son el insumo principal para el desarrollo del análisis estructural.
3. Posteriormente se compiló la información de los reportes públicos y/o suministrados con consentimiento de la empresa Operadora Minera S.A.S. referente a los aspectos técnicos y operativos relacionados con la extracción, el beneficio y los componentes económicos, ambientales y sociales.

4. Finalmente se redactó este manuscrito, el cual incluye la integración de toda la información adquirida y propuesta en los objetivos de este trabajo relacionados con el depósito vetiforme de La Ye.

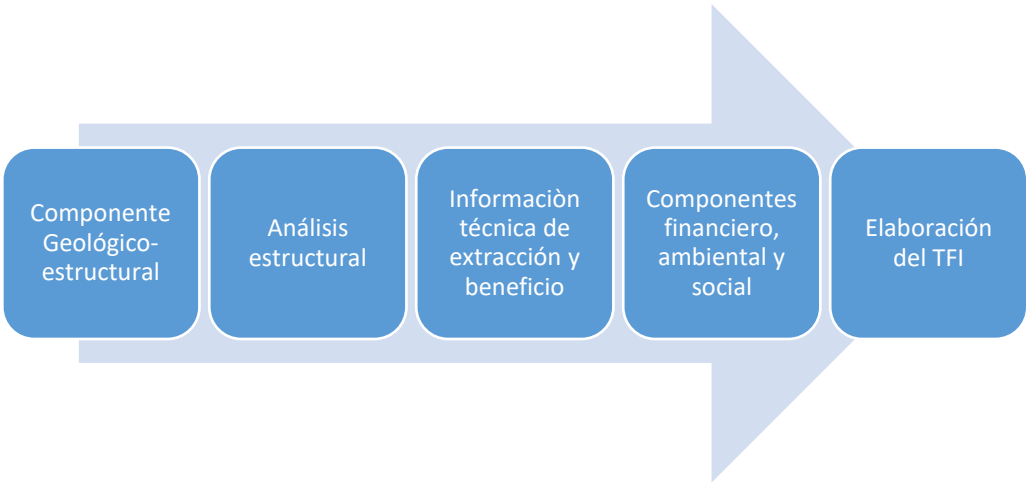

Fig. 2. Ruta metodológica para la elaboración del presente TFI.

4. ANTECEDENTES

4.1. Antecedentes de exploración de la veta La Ye

Los procesos de exploración para el *target* La Ye comenzaron formalmente en junio del 2004, enfocados en la mina La Ye, una mina de propiedad del señor Orlando Correa que presentaba una producción de 6.5 toneladas/día, durante doce años, con un método de explotación consistente en cámaras y pilares. Mediante un convenio de exploración y cesión de los derechos mineros de la licencia 5766, Operadora Minera SAS obtiene el derecho de exploración sobre esta área.

Los trabajos iníciales se concentraron en el muestreo y cartografía de esta mina y la definición de la traza en superficie, posteriormente se realizó una campaña de 10 perforaciones buscando definir 2 niveles, la cual finalizó en julio del 2005 con resultados positivos que mostraban la continuidad de la mineralización. Basados en estos resultados en octubre de 2005, se continuó con una etapa de exploración subterránea con túneles por medio de dos inclinados en los sectores sur (donde se encontraban ubicados los trabajos antiguos del anterior propietario) y sector norte, y el avance de guías (niveles horizontales) en dos niveles en cada uno de los sectores, que finalizó en diciembre de 2007. Los resultados obtenidos permitieron inferir, indicar y medir recursos de interés para continuar con la exploración.

Después de finalizada esta etapa, en enero de 2009 se comenzó la preparación y desarrollo de la mina, con el objetivo de producir 300 toneladas/ día. Paralelamente con el desarrollo de la mina se realizó la construcción de la planta de beneficio la cual actualmente se encuentra en producción.

4.2. Antecedentes bibliográficos y académicos

En el contexto académico y técnico existe información generada respecto a el distrito minero de El Bagre-Zaragoza y específicamente sobre la veta La Ye relacionada con el contexto geológico, las características litológicas, aspectos relacionados con la metalografía, la metalogénesis y los aspectos tectónicos y estructurales más representativos.

Los trabajos más relevantes relacionados con la estructura vetiforme de la Ye son los siguientes:

- Londoño-Herrera, Montoya-García, Ordoñez-Carmona y Restrepo Álvarez (2009). efectúan una investigación que se basa en el análisis de muestras de roca en las vetas el Carmen y en las vetas de La Ye, definiendo a partir de análisis metalográficos dentro de sulfuros como pirita, galena, calcopirita, eventos de mineralizaciones de los análisis de campo y geocronológicos, sugieren que las rocas están emplazadas en estructuras muy profundas relacionadas aparentemente con un origen de tipo orogénico.
- Montoya – García y Ordoñez – Carmona (2010). Realizan una cartografía geológica y una caracterización petrográfica de las unidades litológicas, del distrito minero de El Bagre – Nechí, así como una descripción mineralógica y estructural de los depósitos vetiformes permitiendo definir la cinemática de la falla Otú – Pericos, relacionada genética y estructuralmente con el emplazamiento de las vetas del distrito minero El Bagre.
- Castro-Lotero (2015), en su trabajo de investigación de pregrado realizó una caracterización metalográfica, petrográfica y de ocurrencia de oro de las mineralizaciones vetiformes presentes en la mina La Ye y la mina Los Mangos, ubicadas en el distrito minero de El Bagre.
- Naranjo-Sierra, Alvaran-Echeverri y Zapata-Cardona (2016) efectuaron un análisis preliminar metalogénico, isotópico y estructural del depósito vetiforme de la mina La Ye, en el que sugieren que este depósito es compatible con los depósitos de Au orogénico.
- Naranjo-Sierra (2019) en su trabajo de maestría realizó un estudio metalogenético de los depósitos vetiformes de La Ye, Los Mangos y el prospecto Cordero-Balvina que se encuentran contenidos en el distrito minero El Bagre-Zaragoza, proponiendo un ambiente relacionado con orógenos para la formación de los depósitos de este distrito.
- Naranjo-Sierra y Alvaran-Echeverri (2020) realizaron un estudio microtermométrico y de inclusiones fluidas hospedadas en zonas de zonas de cizalla relacionadas con los depósitos vetiformes del distrito minero El Bagre, determinando que este depósito presenta características similares a los depósitos orogénicos.
- Salgado-González, Muñoz-Ospina, Naranjo-Sierra y Cardona-Ríos (2021) efectuaron un análisis de las características estructurales de los depósitos vetiformes de La Ye y Los Mangos, determinando tendencias generales NNW-SSE para la veta La Ye con buzamientos entre 60°-70°SW e identificando tres eventos de deformación que se relacionan con este depósito.
- Naranjo-Sierra (2021) analizó los controles estructurales de mena y las determinaciones geoestadísticas de zonas de alta ley en depósitos vetiformes La Ye, Los Mangos y Cordero del distrito minero de El Bagre-Zaragoza determinando que la anisotropía de la

mineralización de oro y la orientación de los *ore-shoots* presentan una tendencia preferencial hacia el SSE.

5. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra localizada el límite territorial entre los municipios de El Bagre y Zaragoza, al noreste del departamento de Antioquia (Bajo Cauca Antioqueño). Los depósitos vetiformes de mina La Ye y mina Los Mangos se encuentran al sur de la cabecera municipal de El Bagre, las alturas de la zona de estudio oscilan entre los 50 y 200 msnm, su morfología principalmente se compone de colinas redondeadas y quebradas, acompañada de valles aluviales. (Fig. 1)

En el municipio del El Bagre se encuentran las instalaciones y explotaciones principales de la empresa Operadora Minera S.A.S., convirtiendo a este sitio en un eje de importancia minera y comercial. Las coordenadas de la bocamina principal de la explotación subterránea para mina La Ye son las siguientes:

Long: 7.566055	**Lat. -74.818847**
7°33′57.75″N	**74°49'08.32″W**

6. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL DEPÓSITO VETIFORME LA YE

6.1. Geología Regional

Estudios geológicos regionales y de cartografía geológica para el Departamento de Antioquia han sido publicados por varias autoridades del gobierno colombiano, como el Servicio Geológico Colombiano (anteriormente nombrado INGEOMINAS).

En las cartografías regionales realizadas por González (2001) y Gómez-Tapias et al (2015), la estructura vetiforme de La Ye se encuentra localizada en el área conocida como el Distrito Minero Bagre-Nechí. Las rocas aflorantes en la Cordillera Central han tenido una evolución geotectónica compleja con eventos de acreción, colisión, extensión y subducción, con expresión desde el Precámbrico al Periodo Cuaternario.

La región norte de la Cordillera Central donde se encuentra localizada la estructura de La Ye, está constituida por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que se encuentran limitadas por una serie de fallas importantes pertenecientes al sistema Palestina-Bagre-Nus–Otú (Fig. 3).

De manera general el marco geológico regional puede ser dividido en cuatro dominios geológicos: el primer dominio localizado al oeste, conformado por rocas metamórficas Paleozoicas, donde predominan principalmente gneises cuarzo-feldespáticos y esquistos actinolíticos y cloríticos. El segundo dominio, en la porción central del área, representado por el Plutón de El Carmen de edad Carbonífero, el Batolito de Segovia, de edad Jurásica, y por rocas volcano-sedimentarias de edad Cretácica (Vulcanitas de Segovia y Sedimentos al este de Segovia). El tercer dominio localizado al E está conformado por los denominados gneises cuarzo-feldespáticos de San Lucas, de edad Precámbrica. Finalmente, el cuarto dominio está constituido por depósitos aluviales recientes que cubren gran parte del área.

A continuación, se referencian las principales unidades geológicas que conforman el contexto regional del depósito vetiforme de La Ye:

Gneises y Anfibolitas (PENSL). Al E del valle del rio Nechí, un cuerpo alargado denominado el complejo de San Lucas se extiende 50 km y está conformado por gneises cuarzo–feldespáticos. Las rocas han sido afectadas por metamorfismo de facies granulita y tienen correlación con las granulitas de 1300 ± 100 a 752 ± 70 Ma de la Sierra Nevada de Santa Marta (González, 2001).

Complejo Cajamarca (PZNF). Según González (2001) y Gómez-Tapias et al (2015) las rocas metamórficas del Complejo de Cajamarca están limitadas al E por la falla de Otú y en el oeste por la falla de San Jerónimo. El complejo está compuesto principalmente por rocas metasedimentarias, cuarcitas, esquistos silíceos y básicos ricos en aluminio, con algunos cuerpos calcáreos que se formaron durante el Paleozoico inferior y han experimentado varios eventos metamórficos. Hacia el este y el oeste del río Nechí aparecen afloramientos de las rocas del Complejo Cajamarca, que están representadas por gneises cuarzo-feldespáticos (Pznf) que tienen estructuras variables de esquisto, gneis y migmatítico.

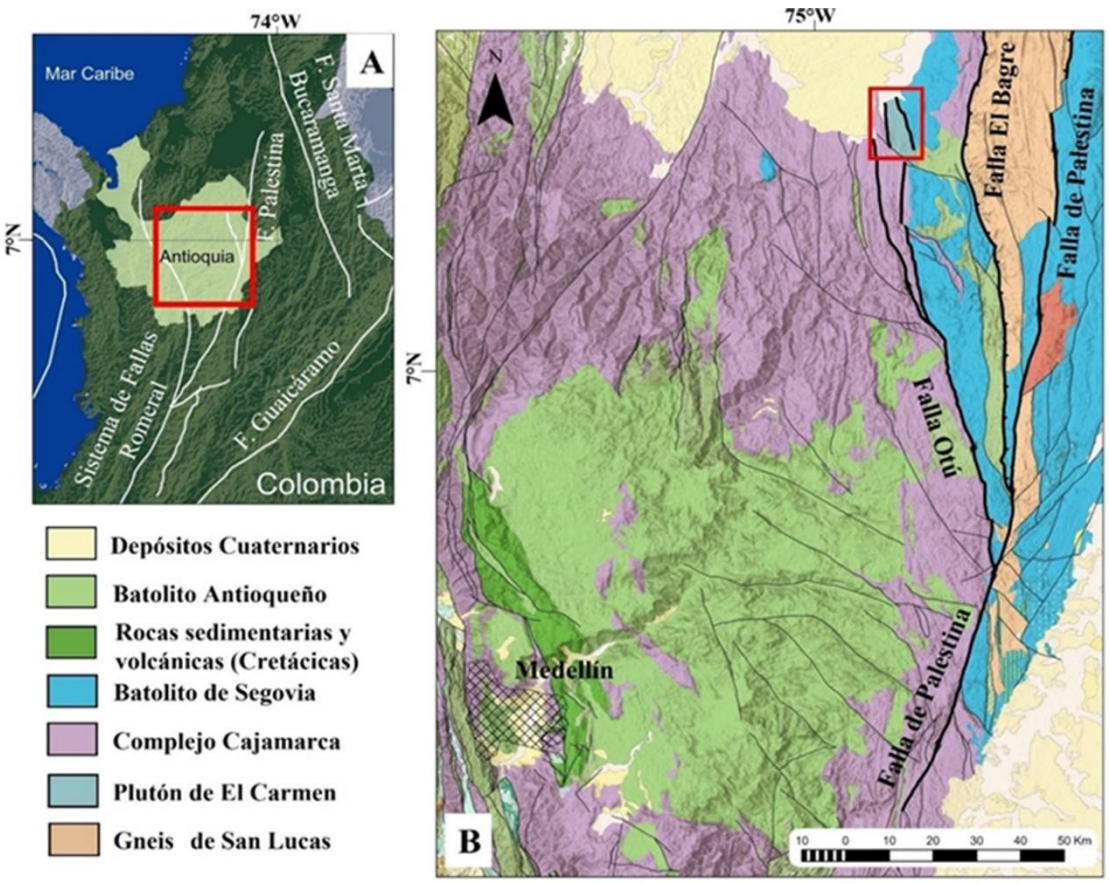

Fig. 3. Contexto geológico regional del depósito vetiforme de La Ye. **A.** Ubicación del departamento de Antioquia. **B.** Localización del Plutón de El Carmen (recuadro rojo), cuerpo hospedante de la estructura vetiforme de La Ye. Tomado de Zapata-Cardona *et al.* (2023).

Plutón de El Carmen. El depósito vetiforme de la Ye se encuentra hospedado en un cuerpo plutónico denominado Plutón de El Carmen. Se trata de un cuerpo plutónico Carbonífero que se encuentra localizado en el sector norte de la Cordillera Central colombiana. Este cuerpo está ubicado entre los municipios de El Bagre y Zaragoza, en el departamento de Antioquia, Colombia, con unas dimensiones aproximadas 12,5 km de largo y 5,0 km de ancho (Gómez-Tapias et al., 2015) y un área aproximada en superficie de 63 km2. El mismo está limitado al occidente y al sur por la Falla Otú y al oriente por un ramal de la Falla Otú denominado Falla Otú-Pericos Este. Está compuesto por dos fases magmáticas generadas en un ambiente de arco continental: la primera está representada por una granodiorita-tonalita de afinidad calco-alcalina, mientras que la segunda corresponde a gabros y dioritas gabróicas de afinidad toleítica (*e.g.* Leal-Mejía, 2011; Zapata-Cardona *et al.,* 2023).

Batolito de Segovia (JDSE). Las dioritas que componen el batolito de Segovia yacen al este del Río Nechí, en contacto fallado (Falla del Bagre) con los gneises de San Lucas al este y en posible contacto fallado al oeste con el Plutón de El Carmen y El Complejo Cajamarca. El Batolito se alarga en sentido norte-sur, coincidiendo con la tendencia de estructuras tectónicas regionales, extendiéndose por 270 km, y en la longitud más corta por 50 Km. Dataciones de U-Pb en circón en la zona central indican una edad de 154±1.6 Ma (González y Londoño 2002; González 2001).

Formación Caucasia (NGCA). Según González, (2001), la formación Caucasia se presenta en su

mayor parte al oeste de la llanura de inundación del río Nechí y consiste en conglomerados pobremente consolidados compuestos de grava y cantos rodados de rocas metamórficas y cuarzo lechoso empotrados en una matriz arcillosa de arena. El contacto con la formación superficial Tarazá es gradual.

Formación Tarazá (NGT). Las rocas de la formación Tarazá son areniscas de color amarillo, pobremente consolidadas, incrustadas transversalmente en la zona y con conglomerados compuestos de gravas ricas en cuarzos lechosos y otros conglomerados localmente esparcidos en los estratos (González, 2001). Esta unidad, junto con la caracterización metalográfica de la Mina La Ye y la Mina Los Mangos, incluye los 11 conglomerados de Caucasia que afloran en la región desde Zaragoza en el sur a todo lo largo del margen occidental de la llanura de inundación del río Nechí hasta elrío Cauca, donde la llanura aluvial se amplía. Hay un claro contacto y escarpamiento entre los sedimentos de Tarazá y los depósitos del cuaternario que cubren el valle Nechí - Cauca, marcando probablemente huellas de la falla de Otú.

Aluvión cuaternario (QAL). Los aluviones del Cuaternario bordean el río Nechí y el río Tigui. Estos depósitos están ligeramente consolidados y se componen de gravas (60% a 70%) y arenas (30% a 40%). Las gravas contienen fragmentos de roca/guijarros gruesos usualmente compuestos de diorita de cuarzo, anfibolita, esquistos sericíticos, vetas de cuarzo, andalucita, cuarcita, gneises feldespáticos de cuarzo y lechos conglomeráticos, localmente caracterizados por fragmentos de cuarzo blanco (González, 2001).

6.2. Geología Local

La veta La Ye es una estructura vetiforme encajada en un cuerpo intrusivo de edad carbonífera en una zona de cizalla y deformación frágil-dúctil que generó milonitización de la roca encajonante, estructuras sigmoidales, *boudinage* y contactos veta-caja reactivados con presencia de salbanda (gauge) (Naranjo *et al*., 2016).

6.2.1. Características litológicas de la veta La Ye

La estructura vetiforme de La Ye es una estructura tabular que ha sido reconocida por 2.2 km aproximadamente en la dirección del rumbo y 300 m en el sentido del buzamiento, con un espesor promedio de veta de 1.15 m. (Naranjo-Sierra, *et al*. 2016, Naranjo-Sierra, 2021).

La veta La Ye está compuesta principalmente por cuarzo bandeado (70 – 90%), carbonatos (hasta 10%), sericita (5%), pirita como principal sulfuro (1 – 10%), galena (hasta el 5%), calcopirita, molibdenita y telururos de Au-Ag (hasta 1%) (Fig. 4).

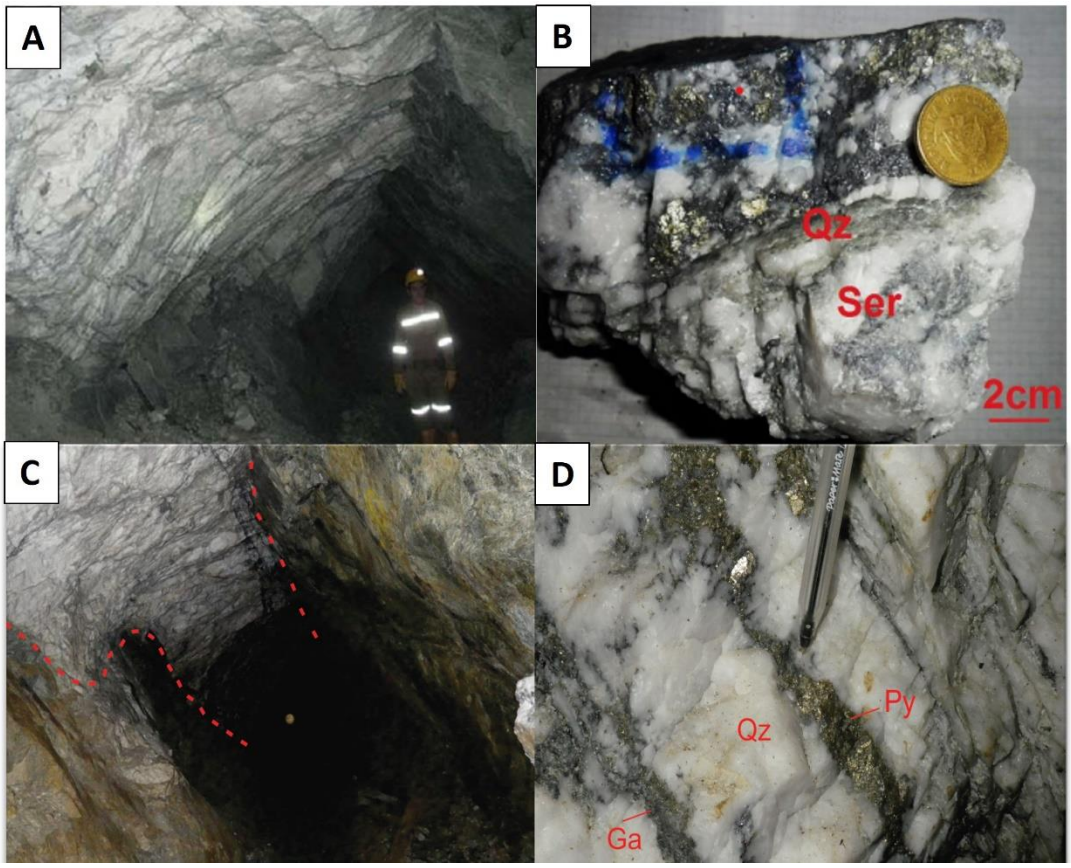

Fig. 4. Características de la veta La Ye. **A**. Dimensiones de la veta La Ye en un panel de explotación. **B.** Muestra de veta con contenido de cuarzo (Qz), y sericita (Ser), pirita y galena (tomado de Castro-Lotero, 2015). **C.** Veta La Ye en contacto neto con la roca caja (tonalita del Plutón de El Carmen). **D.** banda de pirita y galena interdigitadas con cuarzo bandeado.

6.2.2. Características de la roca caja

La roca caja que contiene la veta La Ye está definida por un cuerpo tonalítico principalmente y en menor proporción cuarzodioritas del plutón de El Carmen. Las rocas están caracterizadas macroscópicamente por una facies holocristalinafanerítica leucocrática (Fig. 5A y B), constituida por plagioclasa (hasta 5 mm), cuarzo (hasta 4 mm) y anfíbol (hasta 10 mm), estos últimos parcialmente alterados a clorita (Zapata-Cardona *et al.,* 2023).

Las rocas de caja de la estructura de La Ye, cerca de los contactos con las vetas evidencian una textura milonítica con indicadores cinemáticos sinestrales (Varona-Bravo *et al.,* 2016) y un halo de alteración limitado a pocos centímetros posterior al contacto con la veta. Este halo está constituido principalmente por cloritización de minerales como biotita y anfíboles (Fig. 5C y D). La presencia de fragmentos de roca de estas rocas ígneas al interior de las vetas del distrito minero es común. Son angulosos y presentan una alteración sericítica indicando que este cuerpo ígneo se encontraba ya cristalizado al momento de la actividad hidrotermal (Naranjo-Sierra, 2019).

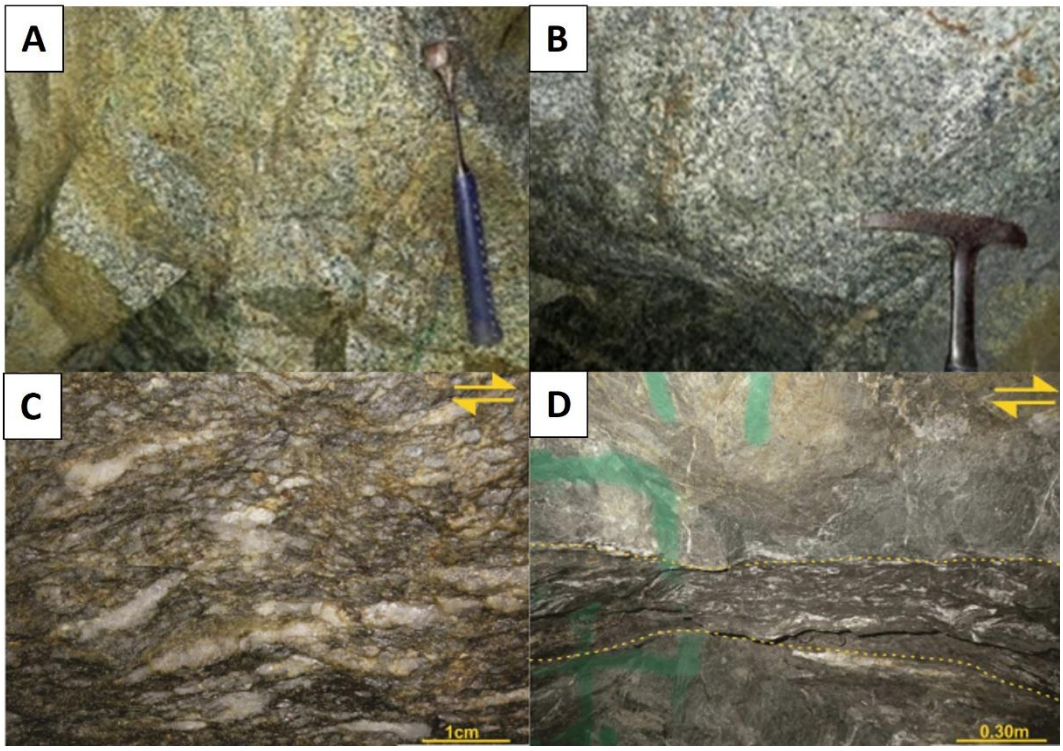

Fig. 5. Características de las rocas encajantes de la veta La Ye. **A.** Cuerpo tonalítico presente en la mina La Ye. **B.** Cuerpo tonalítico - granodiorítico observado en la mina La Ye (tomado de Zapata-Cardona *et al.,* 2023). **C.** Textura milonítica sobre la roca caja de la veta La Ye en detalle. **D.** Textura milonítica desarrollada sobre cuarzodiorita (Tomado de Naranjo-Sierra, 2019).

6.3. Características mineralógicas y petrográficas de la veta La Ye

Se han identificado al menos dos eventos de mineralización para la veta La Ye (Naranjo-Sierra, 2019), estos fueron reconocidos mediante análisis de microscopía óptica convencional complementados con microscopía electrónica de barrido (SEMEDS). La primera etapa (E1) está determinada por proporciones significativas de cuarzo acompañado por pirita y oro (Fig. 6). La segunda y la etapa con mayores concentraciones de Au (E2), está conformada por sulfuros de metales base (calcopirita y en menor proporción galena), telururos de Au (calaverita), telururos de Au-Ag (silvanita y hessita), telururos de Pb (altaita), telururos de Hg (coloradoita) y oro. La presencia de telururos es la característica de esta etapa (Naranjo-Sierra, 2019).

Distribuidos de una forma homogénea al interior de la veta La Ye, se observó moscovita y calcita como minerales de alteración hidrotermal dominantes. Microscópicamente la moscovita presenta formas alargadas subhedrales y tamaños que varían desde 3 micras hasta 0,2 mm. Los cristales de calcita generalmente se encuentran en venillas de 10-20 micras de espesor o como acumulaciones pequeñas de cristales sin una distribución preferencial. La presencia de hidróxidos de hierro (goethita) está limitada a las exposiciones de veta más cercanas a la superficie, generalmente se presentan como pátinas que tiñen de color pardo rojizo la veta producto de alteración supergénica (Naranjo-Sierra, 2019).

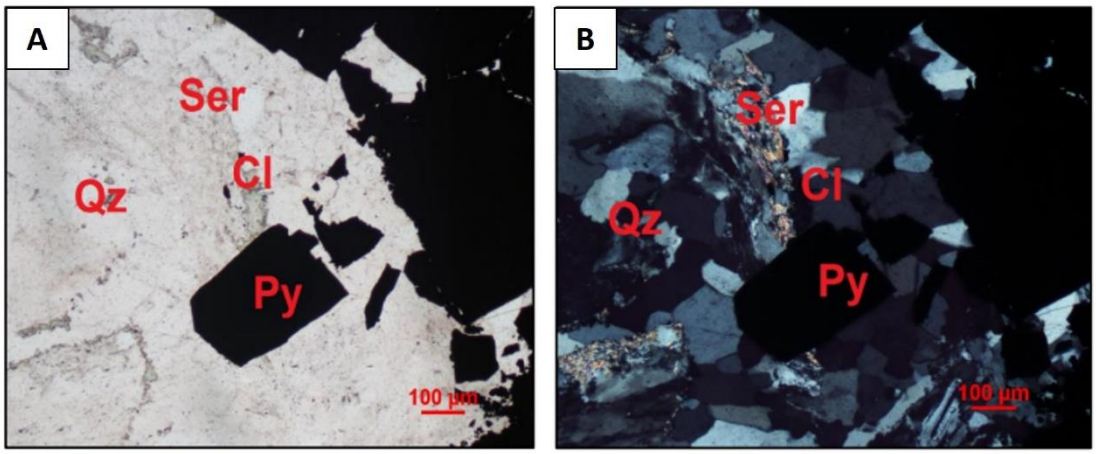

Fig. 6. Características petrográficas de la veta La Ye. **A.B**. muestra en sección delgada – pulida de la veta para mina La Ye, con una mineralogía de cuarzo (Qz) + sericita (Ser) + pirita (Py) +/- clorita (Cl), definiendo una alteración fílica. 10x_Nll_Nx_LT (tomado de Castro-Lotero, 2015).

6.3.1. Texturas de cuarzo

A partir del análisis de secciones delgadas – pulidas elaboradas por Castro-Lotero (2015), se pudo determinar diferentes texturas de cuarzo que permiten sugerir cambios de presión, temperatura, tiempo de enfriamiento de los fluidos mineralizantes que participaron el proceso de formación de la estructura La Ye.

- **Textura masiva:** La textura masiva se está definida por la presencia de agregados microcristalinos de granos de formas y tamaños regulares que no poseen una disposición definida (Fig. 7A), los granos son homogéneos con ausencia de fracturas por cizallamiento, que se debe al producto de cristalización directa de los fluidos hidrotermales (Castro-Lotero, 2015)

- **Textura *Comb* o en peine**: Se caracteriza por la presencia de cuarzo con tamaños uniformes, y terminaciones euhédricas (Fig. 7B), suelen tener una estructura interna zonada, indicando eventos posteriores a la circulación de fluidos (Dong et al., 1995), los prismas de cuarzo exhiben una orientación perpendicularmente a las fracturas de cuarzos primarios (Castro-Lotero, 2015).

- **Textura en mosaico**: La textura en mosaico se caracteriza por cristales enlazados entre si evidenciando bahías con bordes irregulares como producto de recristalización y transformación de la sílice amorfa en cuarzo (Fig. 7C), favorecida por condiciones de alta temperatura, pH, salinidad y presencia de Mg y tiempo (Castro-Lotero, 2015).

- **Texturas de recristalización:** Castro-Lotero (2015), basado en la clasificación de texturas de cuarzo propuestas por Stipp *et al*. (2002) y Owona *et al.* (2013) definió 4 texturas principales de recristalización (Fig. 7D):

  BLG: consiste en los primeros inicios de fisuras entre los contactos de los granos de

cuarzo, se sugiere que esta textura se produce a temperaturas entre los 250 y 300 °C.

SGR: textura de transición, primeras formaciones de abultamientos dentro de los límites de granos de cuarzo, se dan las primeras evidencias de lo que se define como "*Bulging Quartz"* y que se estima que se genera a temperaturas entre los 300 y 400 °C.

GBM: Formación de porfidoclasto de cuarzo en contactos irregulares entre los granos, según los autores mencionados previamente se estima que se forma entre los 500 y 600 °C.

GBAR: fase final de la deformación, las condiciones de elevadas temperaturas dan paso a la formación de clastos de cuarzo formando puntos triples, esto generado a partir de un cuarzo recristalizado como fase inicial, sus temperaturas son mayores a los 700 °C.

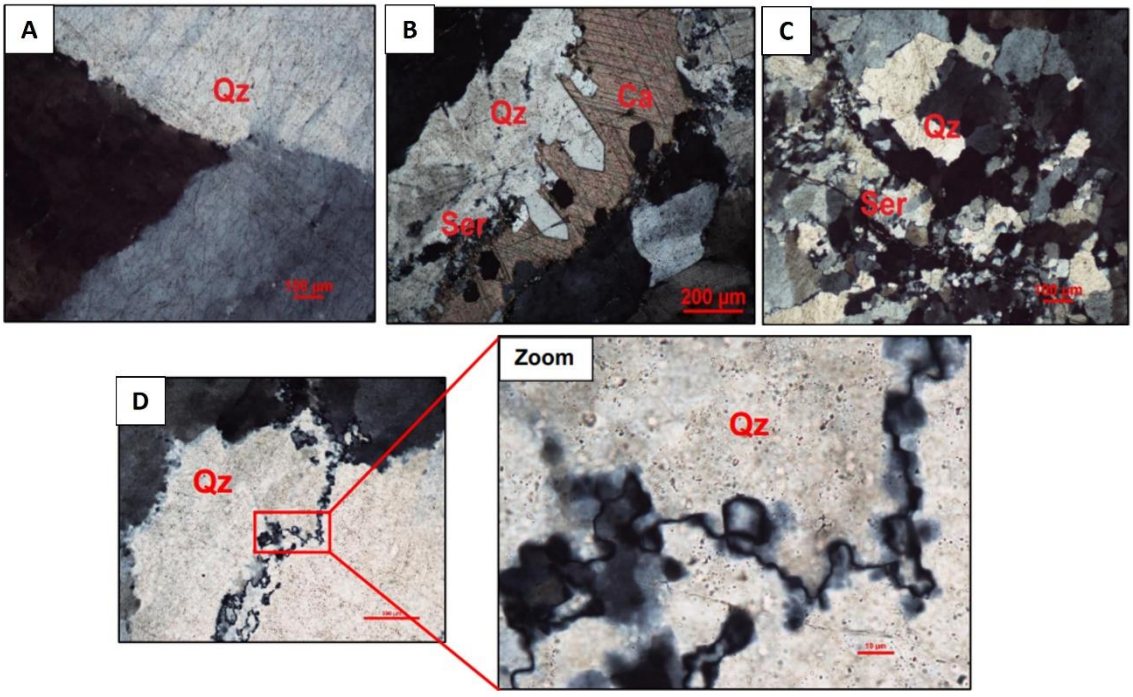

Fig. 7. Textura de cuarzo de la veta La Ye. **A**. Textura masiva, granos de cuarzo (Qz) en contacto neto de formas y tamaños regulares. 10x_Nx_LT. **B**. Textura Comb o en peine se ven granos de cuarzo (Qz) con formas de diente, creciendo perpendicular a una fractura que está siendo rellenada por carbonato (Ca) y sericita (Ser), 5x_NX_LT. **C.** Textura en mosaico, granos de cuarzo (Qz) de formas anhedrales en contacto irregular, se caracteriza por ser una textura de recristalización, 5x_Nx_LT. **D.** Primeros inicios de recristalización del cuarzo (Qz) definido como un BGL, encontrando texturas de "*Bulging Quartz,* 50x_Nx_LT. Las imágenes y los pies de página fueron tomados y modificados de Castro-Lotero, 2015.

6.4. Metalografía de la veta La Ye

Los principales minerales metálicos para la veta La Ye están dominados por la presencia de: pirita, galena y calcopirita, como sulfuros predominantes, acompañado de cuarzo, carbonatos, sericita y epidota.

La presencia de telururos de Pb, Ag, Au-Ag (altaíta, hessita, silvanita) fue determinada en secciones delgadas pulidas. El oro se encuentra de dos formas: asociado a los sulfuros, en contacto directo con ellos, o incluido dentro de los sulfuros, lo que implica una formación genética diferente. En el caso del oro asociado, también se puede encontrar en su forma libre, rodeado por cristales de cuarzo (Castro-Lotero, 2015)."

6.4.1. Sulfuros

El sulfuro predominante en las muestras pertenecientes a la veta es la **pirita**, la cual se encuentra desde tamaños de aproximadamente 5 µm hasta unos cuantos milímetros con formas subhedrales. La presencia de fracturas es muy común en estos cristales, las cuales, en una proporción significativa están rellenas por galena y, en menor proporción, por calcopirita (Fig. 8A).

La **galena** es el segundo sulfuro en abundancia. Se caracteriza por presentarse en forma subhedral y con sus clásicos pits triangulares (deformados), y se encuentra asociada a pirita, calcopirita, telururos (altaíta, hessita, silvanita) y oro. El oro se encuentra incluido dentro de la galena, lo que indica que está encerrado en su estructura cristalina. Los tamaños del oro varían generalmente entre 5 µm y 90 µm (Castro-Lotero, 2015). En algunos cristales de pirita, intercrecidos con galena (Fig. 8B), se observan golfos de corrosión, lo que sugiere un posible reemplazo de la galena por pirita.

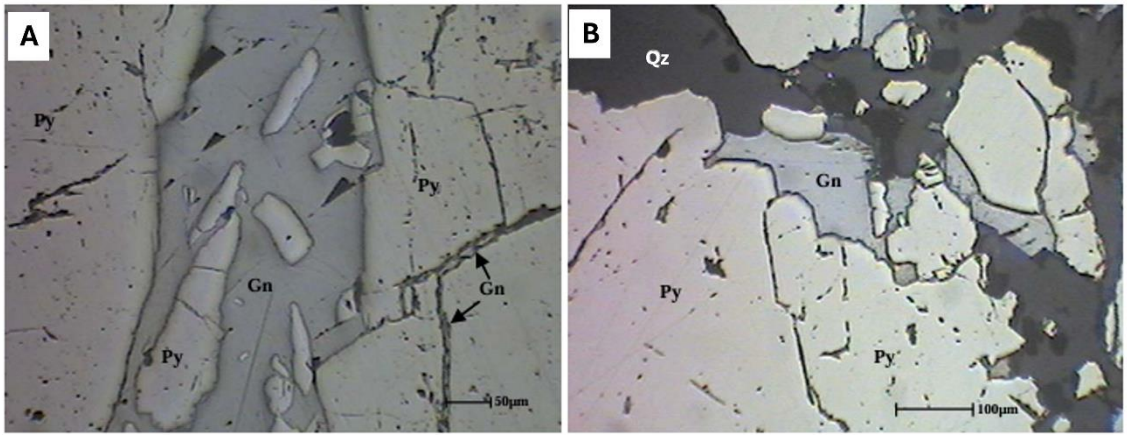

Fig. 8. Pirita y galena en secciones delgadas pulidas 10x_Nll_LR. **A**. Galena rellenando fracturas a lo largo de cristales de Py. **B.** Galena intercrecida con Pirita (Py: pirita, Gn: galena, Qz: cuarzo)

La **calcopirita** se encuentra ocasionalmente en algunas muestras, esta presenta altas concentraciones en muestras puntuales con porcentajes cercanos al 15% del total de sulfuros; La calcopirita se encuentra principalmente rellenando fracturas en la pirita e intercrecida con galena (Fig. 9). Se encuentran de formas anhedrales y con su típico color amarillo, el tamaño de

sus granos varía entre 5 µm a 90 µm (Castro-Lotero, 2015).

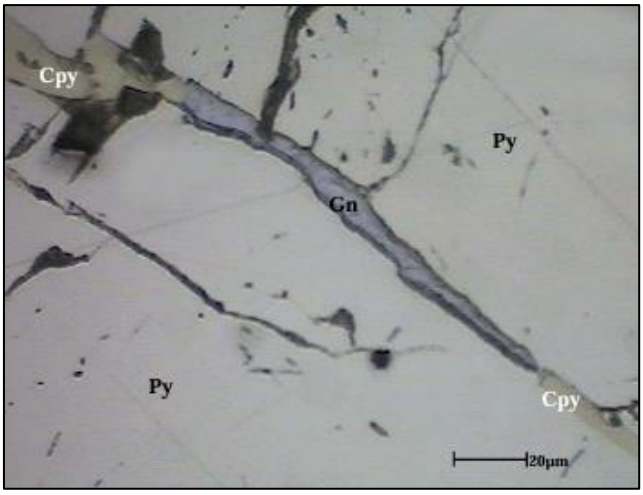

Fig. 9. Galena y calcopirita rellenando fractura a lo largo de un cristal de Pirita. 10x_Nll_LR. (Py: pirita, Gn: galena, Cpy: calcopirita).

6.4.2. Telururos

La **altaita** se encuentra en menores proporciones (1 -2%), su principal asociación es con la galena ya sea como finas inclusiones o hacia sus bordes. Se encuentran cristales desde aproximadamente 5 µm hasta 100 µm, también se presenta a lo largo de algunas fracturas en pirita, intercrecida con calcopirita y galena (Fig. 10). Ocasionalmente está como inclusiones en pirita y calcopirita, siendo de tamaños muy finos.

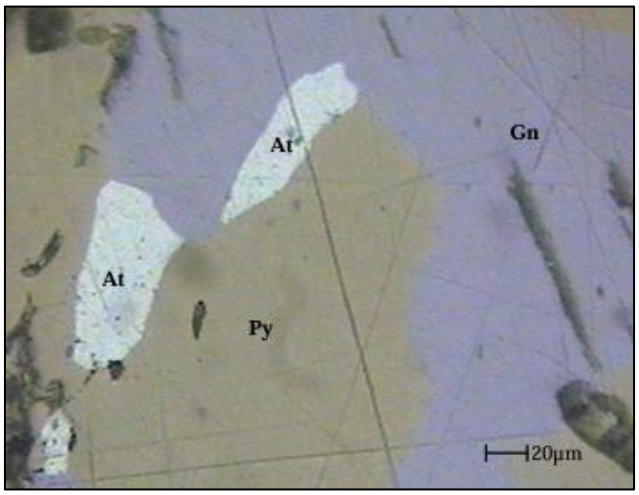

Fig. 10. Altaita intercrecida con galena y Pirita. 10x_Nll_LR. (Py: pirita, Gn: galena, At: altaita).

La **hessita** presenta un contenido promedio de teluro de 35% y de plata del 65%. Está asociada a galena, calcopirita, altaíta y oro, tiene un color gris con una tonalidad verde oliva, con formas subhedrales a euhedrales con tamaños entre las 8 µm a 15 µm (Fig. 11) (Castro-Lotero, 2015).

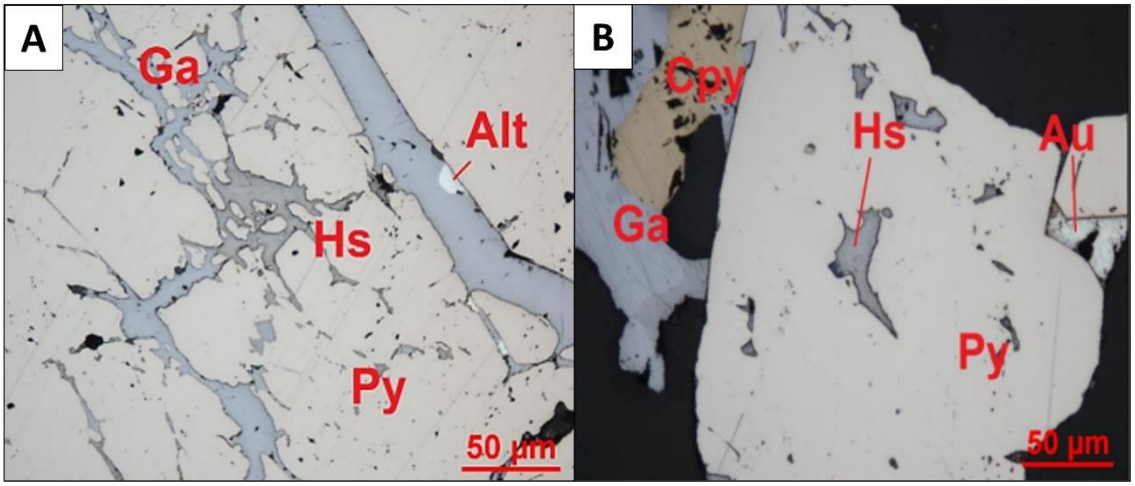

Fig. 11. A. Hessita (Hs) en microfracturas de pirita (Py) asociada a galena (Ga), 20x_Nll_LR. **B.** Grano de hessita (Hs) de forma subhedral en pirita (Py), asociada a galena (Ga) y calcopirita (Cpy), 20x_Nll_LR. Las imágenes y los pies de página fueron tomados y modificados de Castro-Lotero, 2015.

La **silvanita** es un telururo de plata y oro con porcentajes de teluro cercano al 60%, de plata 12% y de oro 25%, definidos a partir de análisis SEM-EDX (Castro-Lotero, 2015). Se encuentra asociada a la galena, se caracteriza por su color blanco con leve anisotropía, formas subhedrales a euhedrales y con tamaños que varían entre las 30 µm a 60 µm. (Fig. 12).

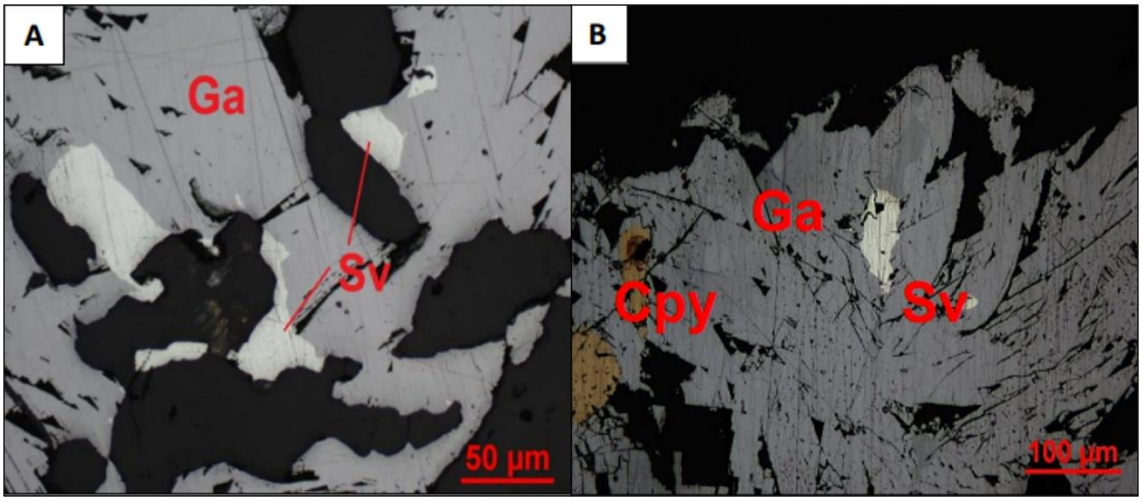

Fig. 12. A. Silvanita (Sv) asociada a galena (Ga), de forma subhedral, 20x_Nll_LR. **B.** cristal de silvanita (Sv) en contacto con galena (Ga) y calcopirita (Cpy), se caracteriza por su forma subhedral, 10x_Nll_LR. (tomado y modificado de Castro-Lotero, 2015).

6.4.3. Elementos Nativos

En la Mina La Ye, el oro se presenta de forma libre, asociado al cuarzo y la pirita, lo que sugiere un evento mineralizante temprano. Un segundo evento mineralizante, en el cual se alcanzan las concentraciones más significativas de oro, se encuentra asociado a sulfuros y telururo, rellenando fracturas, al igual que en la pirita. El oro en el depósito vetiforme de La Ye se

identificó en dos formas: como oro nativo y como electrum (una aleación de oro y plata) (Castro-Lotero, 2015). El oro nativo está contenido principalmente en la pirita y en los telururos, pero no en telururos que no contienen oro.

Au nativo y Au electrum: El oro nativo se caracteriza por sus propiedades ópticas isotrópicas, mostrando un color dorado típico bajo luz polarizada en nicoles paralelos. En cruzados, presenta estrías de pulimiento de tonalidades verdes. Se encuentra en forma libre y en ocasiones está en contacto con sulfuros y telururos, pero no está incluido dentro de ellos (Fig. 13A y B). Por otro lado, el oro electrum se presenta con un color blanco en nicoles paralelos y tiene una anisotropía anómala que genera tonalidades azules junto con estrías de pulimiento. Este oro se encuentra en asociación con calcopirita dentro de oquedades y microfracturas de una pirita inicial. Además, existen telururos de oro (altaíta, hessita, silvanita) en los que el oro está combinado con telurio, lo que indica una formación mineralógica distinta del oro nativo y el electrum (Castro-Lotero, 2015). (Fig. 13C y D).

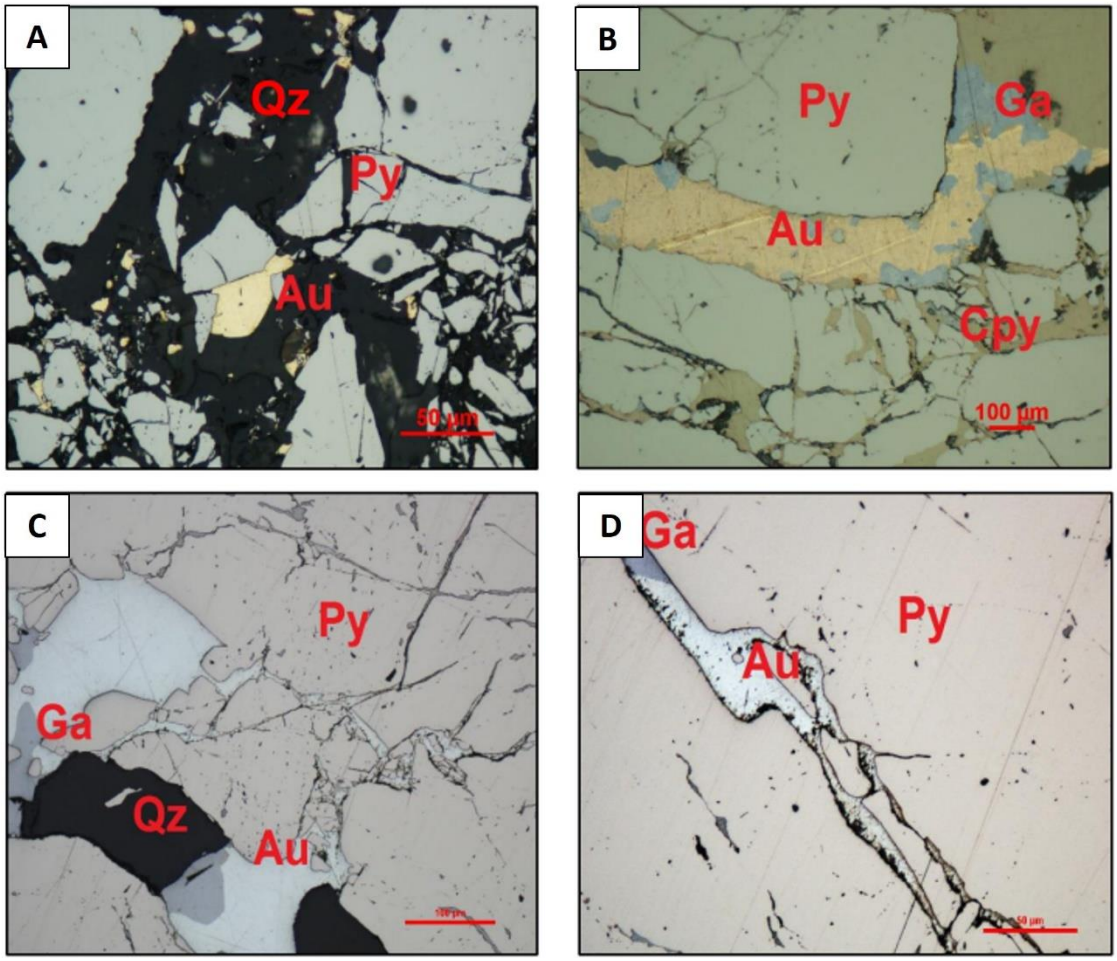

Fig. 13. Presentación del de Au en la veta La Ye**. A.** Grano de oro libre (Au) asociado a cuarzo (Qz) y pirita (Py) definiendo un evento temprano de mineralización, 20x_Nll_LR. **B.** Granos de oro (Au) dentro de microfracturas de pirita (Py) asociado a galena (Ga), calcopirita (Cpy), definiendo un segundo evento mineralizante. 10x_Nll_LR. **C.** Oro electrum (Au), asociado a galena (Ga) se encuentra dentro de microfracturas de pirita (Py), 20x_Nll_LR. **D.** Grano de oro electrum (Au) asociado a galena (Ga) dentro de microfracturas de pirita (Py), 20x_Nll_LR. (tomado de Castro-Lotero, 2015).

6.4.4. Distribución granulométrica de Au en la veta La Ye

Con el fin de observar cómo es la distribución granulométrica de los granos de Au que se encuentran hospedados en la veta La Ye, la empresa Operadora Minera S.A.S. realizó un análisis SEM sobre los granos de Au. En el histograma de tamaños de grano vs. frecuencia de la Fig. 14, se graficaron los diámetros mayores de los granos, sin tomar en cuenta el Au que se encuentra a lo largo de las fracturas (por las diferencias tan marcadas entre sus longitudes y espesores), y se registró que el 90% de los granos se encuentran en el intervalo de 0-35 micras con una población significativa entre 0.1 – 10 micras (60% aproximadamente).

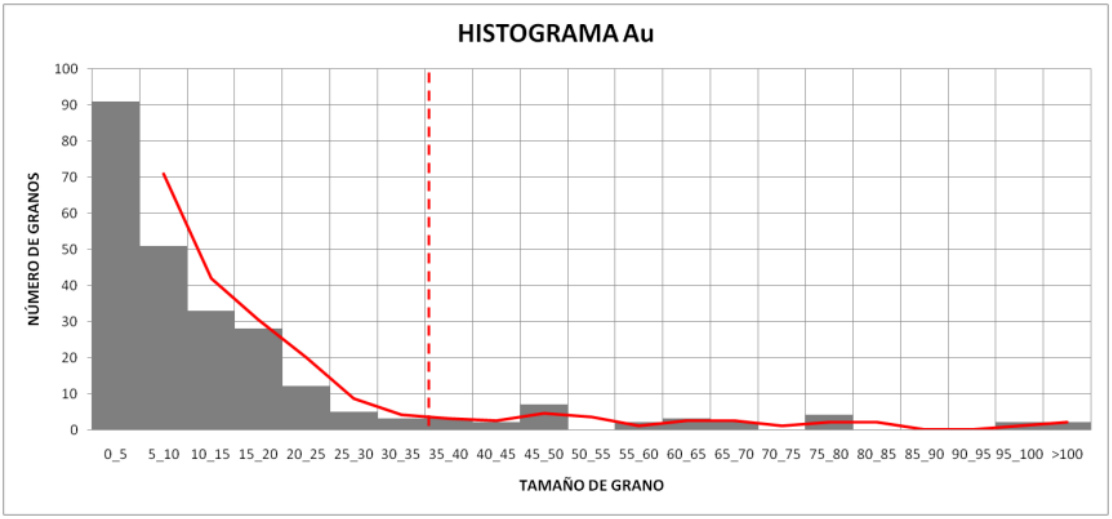

Fig. 14. Histograma de tamaños de granos vs la frecuencia.

6.4.5. Paragénesis y asociación mineralógica de la veta La Ye

Las asociaciones minerales y texturales observadas permiten definir una secuencia paragenética en donde se evidencian al menos dos eventos de mineralización (Fig. 15). El primero constituido por volúmenes significativos de cuarzo, con poco sulfuro (pirita) y cantidades menores de Au. El segundo evento mineralizante está conformado por cantidades escasas de cuarzo, con presencia de sulfuros como: galena, pirita y calcopirita, además de telururos de Ag-Au y Pb como silvanita, hessita y altaita (Naranjo-Sierra *et al.,* 2016).

Distribuidos a lo largo de las exposiciones de la veta al interior de la mina, se presenta sericita y calcita como minerales de alteración hidrotermal dominantes. Microscópicamente la sericita presenta formas alargadas subhédricas y tamaños que varían desde 10 micras hasta 0.8 mm. Los cristales de calcita generalmente se encuentran en venillas de 10–20 micras de espesor o como acumulaciones pequeñas de cristales sin una distribución preferencial. La presencia de goethita está limitada a las exposiciones de veta más cercanas a la superficie, generalmente se presentan como pátinas que tiñen la veta de color pardo rojizo (Naranjo-Sierra *et al.,* 2016).

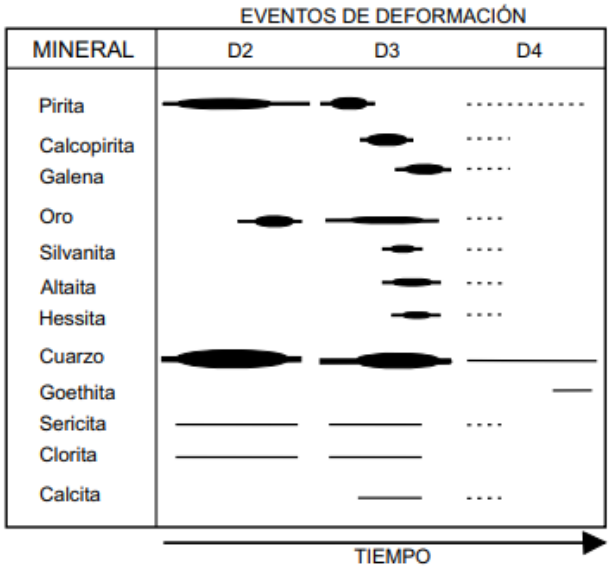

Fig. 15. Secuencia paragenética propuesta para la veta La Ye, en donde se evidencian al menos dos eventos mineralizantes principales. (tomado de Naranjo-Sierra *et al.,* 2016).

6.5. Geología estructural

6.5.1. Estructuras regionales

En la región norte de la Cordillera Central las principales fallas que afectan el área en donde se encuentra emplazada la veta La Ye son: **Otú-Pericos** (sinestral) al oeste y **El Bagre** (¿dextral?), al este (Fig. 3). La traza de la falla El Bagre, ha sido definida a lo largo del contacto entre las rocas Jurásicas y Cretácicas con las rocas Precámbricas. La falla Otú regionalmente es conocida como Otú-Pericos y limita las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (terreno Tahamí) con el basamento Precámbrico e intrusivos Jurásicos del terreno Chibcha (Restrepo y Toussaint, 1989). Para la falla El Bagre se tiene un comportamiento de rumbo con un componente lateral izquierdo (Feininger *et al.,* 1972). La falla El Bagre se presume que es más antigua que la falla Otú y esta a su vez es desplazada por la falla Palestina. En la zona sur del distrito la Falla Otú muestra una inflexión hacia el oeste mostrando un marco favorable para la liberación y generación de estructuras extensivas favorables para contener depósitos vetiformes cuando la cinemática de esfuerzos tectónicos regionales ha tenido componentes dextrales.

6.5.2. Componente Local

Starling (2014) en un reporte privado para la empresa Operadora Minera S.A.S., indica que el depósito vetiforme de la mina La Ye se encuentra emplazado en rocas miloníticas asociadas con el plutón de El Carmen, con un aporte de fluidos mineralizantes posiblemente relacionados con el emplazamiento del batolito de Segovia, aunque Naranjo-Sierra *et al.* 2016 y Naranjo-Sierra 2019 después de datar el evento mineralizante, sugiere que los fluidos mineralizantes que generaron la estructura de La Ye están relacionados con el emplazamiento de plutones

pérmicos. La morfología de la veta La Ye está relacionada con un régimen de deformación entre frágil y dúctil, asociada a una zona de cizalla que generó estructuras sigmoidales y de *boudinage*, además están presentes zonas de brechamiento y cizalla.

Dentro de una definición estructural para el depósito, se identifican al menos 3 fases distintas de deformación: la primera (Fig 16 a) está relacionada con esfuerzos de compresión E-W que generaron la estructura de cizalla que hospeda la veta La Ye, con una dirección entre N-S a NNW, controlando el emplazamiento de los diques (Starling, 2014). Posteriormente se reactivó la zona de cizalla cambiando el sentido de los esfuerzos compresivos regionales a una dirección NNE/SSW, esto generó un componente dextral transpresivo controlando las fases iniciales de vetas de cuarzo y la mineralización (Fig 16 c), finalmente un tercer evento NNW/SSE compresivo (Fig. 16 c) que reactivó el depósito vetiforme formando un control estructural sinestral, este último evento dio paso a nuevos fluidos hidrotermales llevando consigo oro, metales y una segunda etapa de vetas de cuarzo (Starling, 2014).

Después de los dos eventos principales de mineralización, y a partir de la influencia de la placa Caribe en los Andes del Norte se generó un nuevo movimiento en el NW de Colombia durante el Mioceno y Plioceno permitiendo fallamientos inversos con sentido NNW buzando NNE, dando paso a una post mineralización que se extiende sobre las vetas de mina La Ye (Starling, 2015).

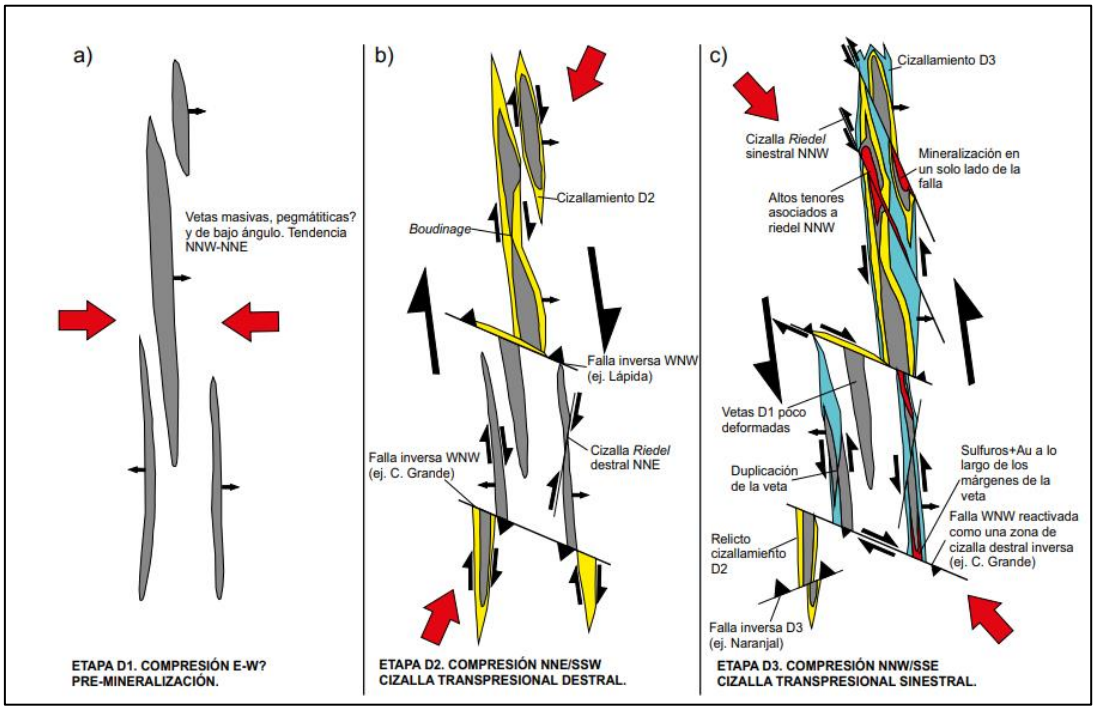

Fig. 16. Esquema del modelo estructural presentando los 3 principales eventos de deformación que afectaron y controlaron la mineralización de la veta La Ye. Tomado de Naranjo-Sierra *et al.,* 2016.

7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL DEPÓSITO LA YE

Para el análisis estructural se dividieron los datos en 3 clases principales: datos de veta, datos de fallas mayores y datos de fallas menores. La división entre fallas mayores y menores se efectuó después de realizar los análisis de las perturbaciones que estas estructuras causan a la veta, dividiéndola en bloques de vetas limitadas por fallas (fallas mayores) o si los desplazamientos son de carácter local o mínimo (fallas menores). En la Fig. 17 se muestran lo que para este análisis se denominaron fallas mayores.

Posteriormente se graficaron los datos en el programa Stereo32, donde se diseñaron gráficos de rosa de *dip* y *strike*, además de gráficos de polos para determinar las principales tendencias y dilucidar las relaciones entre estas. En el anexo A (Datos estructurales de la mina La Ye) se pueden observar los datos con los cuales se efectuó el análisis.

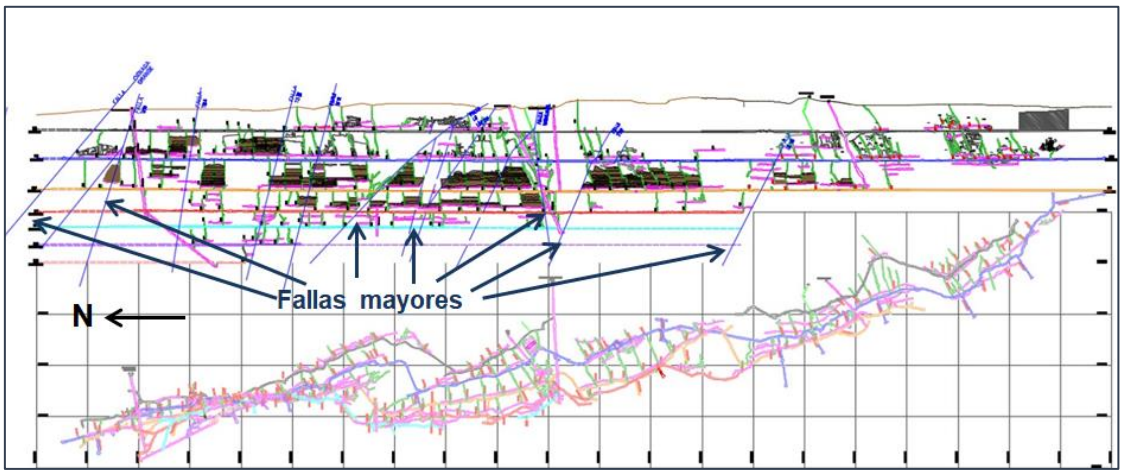

Fig. 17. Mapa en planta y en perfil de la mina La Ye, donde se muestran las principales fallas mayores del sistema estructural.

7.1. Análisis estructural de la veta La Ye

El análisis estructural de la veta contó con 90 datos tomados en los diferentes niveles y sectores de la mina. Para evidenciar las relaciones estructurales se elaboraron gráficos de polos y diagramas rosas de rumbo y buzamiento (Fig. 18 y 19).

Al analizar los gráficos elaborados para los datos de la veta se puede observar que esta estructura presenta una tendencia principal entre N25W° - N10W° (Fig. 18) en dato de rumbo, que sugiere la presencia de una única estructura, y aunque se denotan leves variaciones desde N-S a N50°W, estos son poco frecuentes y podrían corresponder a datos tomados en sitios donde la veta presenta inflexiones o muy cerca de las zonas de falla que desplazan la veta.

Los datos de buzamientos (Fig. 19) presentan una disposición hacia el SW muy marcada, se registran datos que van desde 30° a verticales en un rango entre E-W a S50°W que se corresponde con los datos de rumbo mencionados anteriormente. Algunos datos exhiben buzamientos al NE, pero al analizar el diagrama de polos y los datos asociados a estos patrones de tendencia de buzamiento NE, se observan valores entre 80 – 90°, lo que sugiere que estos

datos puntuales están en zonas donde las vetas presentan cabeceos leves o inflexiones favorecidos por las fuertes pendientes, pero que pertenecen todos a un patrón estructural N-NW con buzamientos al SW y leves inflexiones hacia el NE

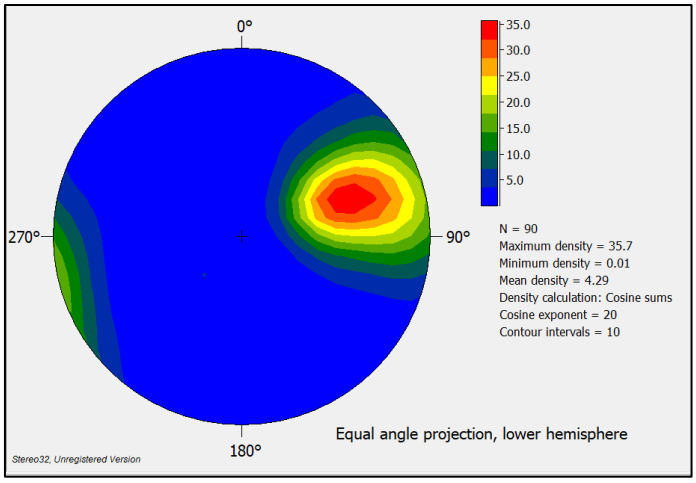

Fig. 18. Diagrama de polos para los datos de la veta.

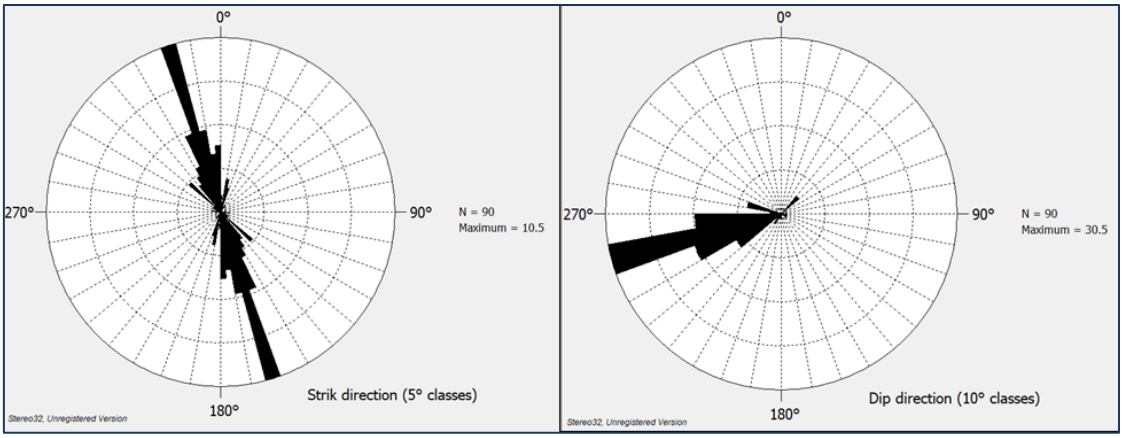

Fig. 19. Diagrama de rosa de rumbo y buzamiento para datos de la veta La Ye.

7.2. Análisis estructural de las fallas mayores

Para este análisis se separaron las fallas mayores y las menores, con lo cual para el análisis de fallas mayores se contó con 18 registros. Estos datos fueron tomados en los diferentes niveles de la mina o en los lugares donde se evidenciaba de una manera más clara la presencia de la estructura. Solo se tuvo en cuenta un dato por estructura de falla, y para cada falla se realizó un promedio de las tendencias y los buzamientos de los datos tomados en campo, para tener un único registro (Fig. 20 y 21).

Al analizar los gráficos elaborados para los datos de las fallas mayores o las estructuras que desplazan de manera significativa a la veta, se puede observar que se registran estructuras con tendencias en direcciones muy diferentes, siendo notorios dos patrones con direcciones entre N40° - 70°W y otra tendencia con datos entre N20° - 25°E (Fig. 20), aunque las poblaciones que se clasifican en estos rangos superan ligeramente la media de datos de otras poblaciones (1.5

datos en la clase mayor), por lo que no es posible deducir un patrón claro o único para las fallas para la zona de estudio.

Los datos de buzamientos que registran valores entre 40° a 90°, presentan dos disposiciones principales; la principal con tendencia N20° - 30°E y una secundaria con datos entre N30° - 70°W (Fig. 21), estas dos tendencias agrupan en su mayoría a los registros de buzamiento, por lo que se infiere que los patrones estructurales de las fallas mayores tienen sentidos de buzamientos hacia el Norte, tanto al oriente como hacia el occidente.

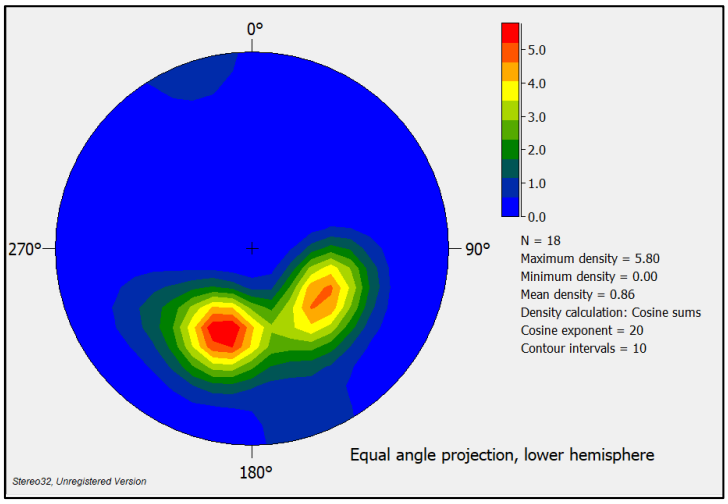

Fig. 20. Diagrama de polos para los datos de las fallas mayores.

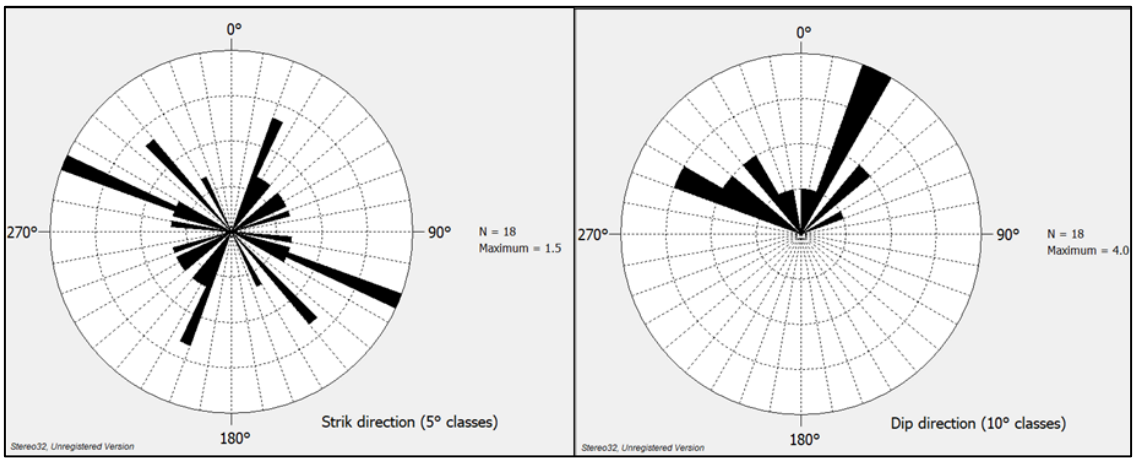

Fig. 21. Diagrama de rosa de rumbo y buzamiento para datos de los datos de las fallas mayores.

7.3. Análisis estructural de las fallas menores

Para este análisis de las fallas menores se contó con 47 registros. Estos datos fueron tomados en los diferentes niveles de la mina o en los lugares donde se evidenciaba de una manera más clara la presencia de la estructura. Las fallas menores son las estructuras de poco espesor y magnitud que desplazan centímetros o pocos metros la estructura mineralizada y que se

encuentran entre bloques de fallas mayores. Solo se tuvo en cuenta un dato por estructura de falla, y para cada falla se realizó un promedio de las tendencias y los buzamientos de los datos tomados en campo, para tener un único registro (Fig. 22 y 23).

En los gráficos elaborados para los datos de las fallas menores se puede observar que se registran estructuras con tendencias en direcciones muy diferentes, siendo notorios dos patrones con direcciones entre N40° - 80°W (Fig. 22) y otra tendencia con datos entre N10° - 15°E, aunque las poblaciones que se clasifican en estos rangos superan ligeramente la media de datos de otras poblaciones (3.5 datos en la clase mayor).

Los datos de buzamientos que registran valores entre 35° a 90°, presentan dos sentidos principales; la principal con tendencia N40° - 80°W y una secundaria con datos N10°-15°E (Fig. 23), estas dos tendencias agrupan en su mayoría a los registros de buzamiento por lo que se infiere que los patrones estructurales de las fallas mayores tienen direcciones hacia el Norte, tanto al occidente como al oriente.

Al comparar los datos de fallas mayores y menores se puede deducir que hay una relación directa entre ambas clases de estructuras, pues las direcciones de rumbo y buzamiento coinciden para las dos clases, teniendo tendencias preferentemente NW-W para el rumbo y buzamientos con sentido al Norte.

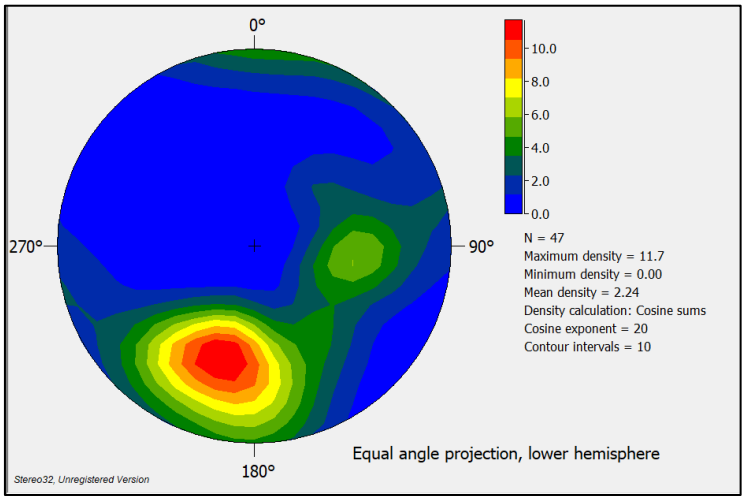

Fig. 22. Diagrama de polos para los datos de las fallas menores.

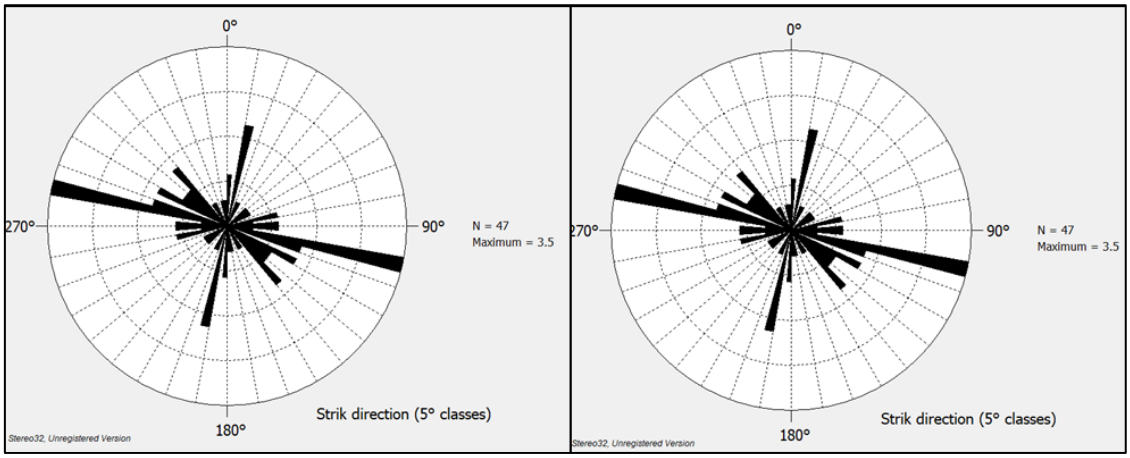

Fig. 23. Diagrama de rosas de rumbo y buzamiento para datos de los datos de las fallas menores.

Después de realizar el análisis estructural se pueden destacar los siguientes aspectos relacionados con el contexto tectónico local de la veta La Ye:

- En los gráficos elaborados para los datos de la veta se puede observar que esta estructura presenta una dirección principal entre N25W° - N10W° en dirección de rumbo, que sugiere la presencia de una única estructura, con buzamiento principalmente al SW.
- El sistema de fallas que afecta la veta presenta una disposición NW-W que es ligeramente preferencial respecto a las demás direcciones para el rumbo, con buzamientos marcados al Norte.
- La regularidad en la dirección y sentido del buzamiento de la veta sugiere que al menos la estructura mineralizada o la estructura primaria que hospedó la mineralización se formó en un único evento que género el espacio o el arreglo estructural del cuerpo mineralizado.
- El hecho que los sistemas de fallas no muestren una tendencia o arreglo estructural con patrones preferentes sugiere que las fallas que se presentan en este sistema mineral pudieron haberse generado en diferentes épocas y con variaciones en los sentidos de los esfuerzos, lo que se constata con la cantidad de direcciones diferentes de las fallas, soportado además, en la edad de las rocas encajantes de la mineralización, que para la zona de estudio ha registrado datos de dataciones carboníferas, sugiriendo un tiempo suficiente para que se formen estructuras asociadas a diferentes tipos de esfuerzos.

8. DISEÑO DE MINA, MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO

En la zona industrial de El Bagre la empresa Operadora Minera S.A.S. instaló la planta de procesamiento que benefició el mineral extraído de la mina La Ye (Fig. 24).

La construcción y el montaje de la planta se completaron en 2010, con una capacidad de producción promedio de 300 toneladas por día. Posteriormente, mejoras en el proceso permitieron incrementar esta cifra a un promedio de 350 toneladas por día.

Fig. 24. Panorámica Planta de Beneficio Mina La Ye.

8.1. Diseño de mina

El diseño de mina para la mina La Ye se basó en el desarrolló de labores horizontales denominadas guías que se desarrollarón por el rumbo de la estructura de la Ye, estas labores se diseñaron con dimensiones de 2.0 m x 2.5 m (Fig. 25) y se conectaron a diferentes niveles mediante el desarrollo de labores denominadas inclinadas, con dimensiones similares a las guías, pero que se efectuaron siguiendo el buzamiento de la estructura. Estas mismas labores sirvieron para la extracción del material mineralizado mediante un sistema de izaje compuesto por un *skip* que transportaba entre 2 y 3 toneladas de mineral hasta superficie donde era depositado en tolvas de almacenaje para su posterior disposición a la planta de beneficio.

La preparación de mina incluyó trabajos de definición de paneles de explotación, para los cuales se realizaron labores como tambores de acceso, tambores de descarga, sobreguías, mejoras en los servicios de agua, aire y energía al interior de mina, que permitieron una explotación racional y adecuada del depósito.

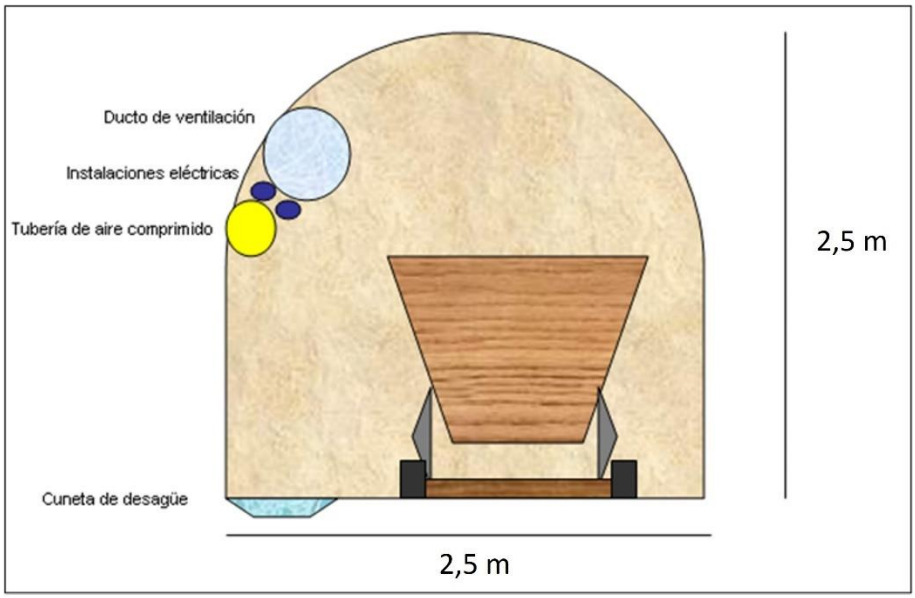

Fig. 25. Sección tranversal de una guía mineral.

8.1.1. Labores mineras de preparación y desarrollo

Las labores mineras subterráneas necesarias para preparar los bloques de explotación y para el desarrollo de nuevos bloques incluyeron guías, cruzadas, tambores de descargue y de servicios, nichos, diagonales, sobreguías, etc.

- **Cruzadas**

Excavaciones realizadas en roca o material estéril fueron diseñadas y ejecutadas cuando se presentaba algún problema estructural que afectaba la continuidad de la veta y cuando la información geológica lo definía. Su sección típica es en forma de bóveda con 2,2 m de ancho por 2,3 m de alto (Fig. 26).

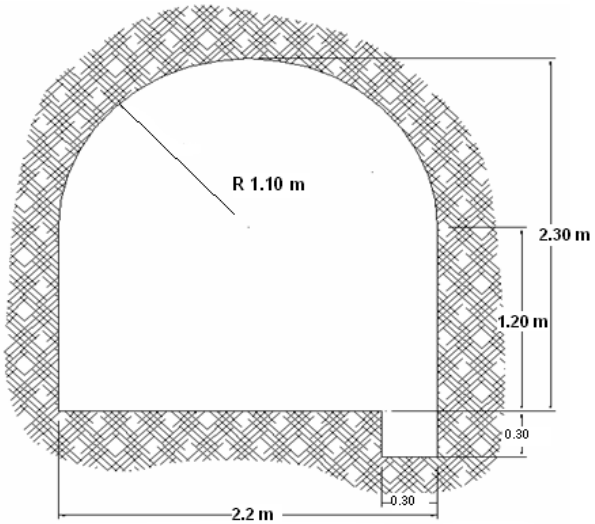

Fig. 26. Sección geométrica de una cruzada.

- **Guías**

Son las labores mineras o excavación desarrollada a lo largo del rumbo de la veta. La sección típica es en forma de bóveda y las dimensiones son iguales al de las cruzadas (2,2 m x 2,3 m). Como las guías avanzan sobre el rumbo de la veta, las secciones pueden tener una variación en su geometría y por consiguiente en el esquema de la perforación y voladura en los barrenos del techo y esto depende exclusivamente del espesor e inclinación de la estructura, tal como se observa en las Fig. 27 y 28.

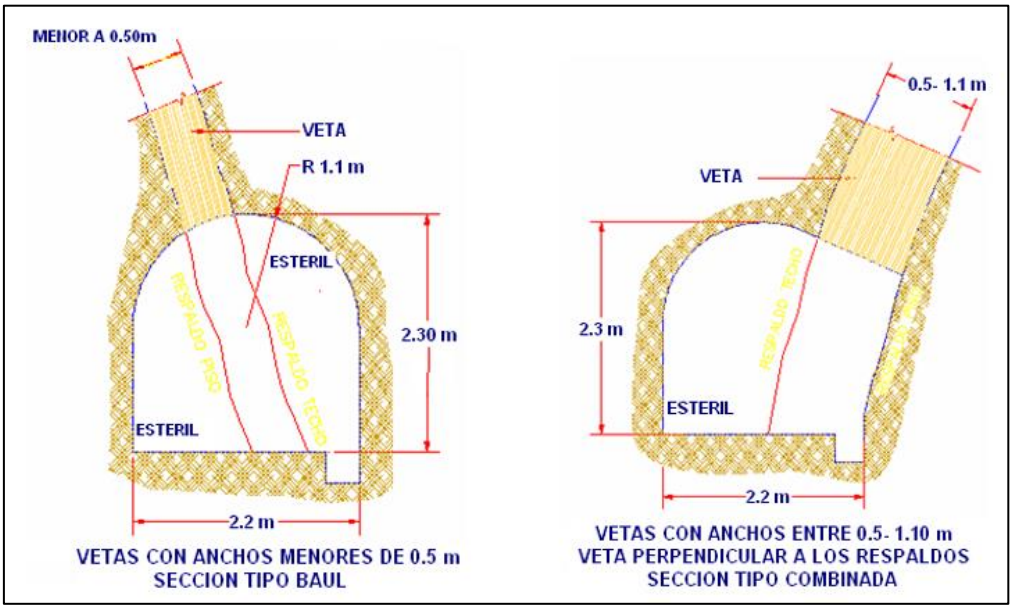

Fig. 27. Secciones geométricas de una guía, menor a 0.5m.

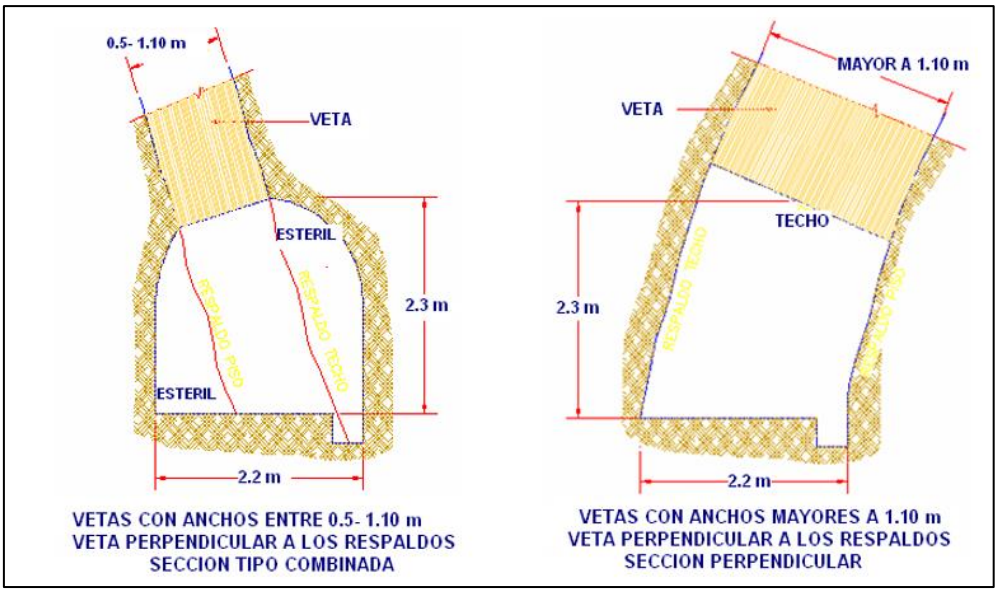

Fig. 28. Secciones geométricas de una guía, entre 0.5 m. y 1.1 m.

- **Sobreguía**

Esta actividad es la primera acción que permitió iniciar las labores de preparación de un panel de explotación localizada sobre un nivel o guía, dejando un pilar o machón de protección de 4 metros encima del nivel y se desarrollada a lo largo del rumbo de la veta.

De acuerdo con el espesor promedio de la veta, el ancho de la sección típica varió entre 1,2 m a 2,0 m con 2,0 m de alto (Fig. 29). El ancho total de la estructura fue extraído en las etapas de producción.

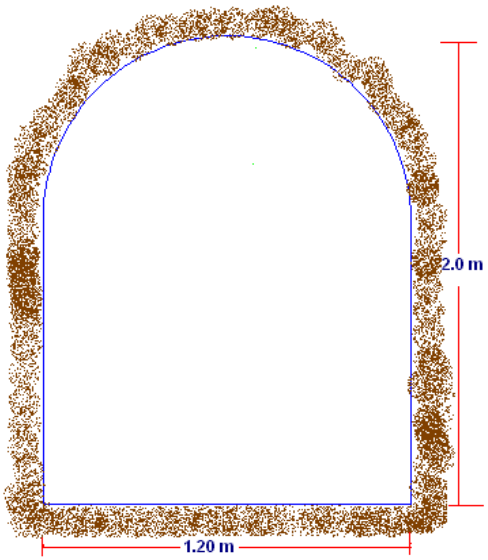

Fig. 29. Sección típica de una sobreguía.

Tambores

Fueron parte de las labores de preparación y una labor minera que varió entre vertical a muy inclinada que va sobre el buzamiento de la veta. Sirvieron para desarrollar actividades exploratorias, preparar paneles, accesos, descarga de material y ventilación.

Dependiendo de su uso se construyeron sobre la veta o sobre estéril. La sección típica es 1.40 m por 1.40 m (Fig. 30).

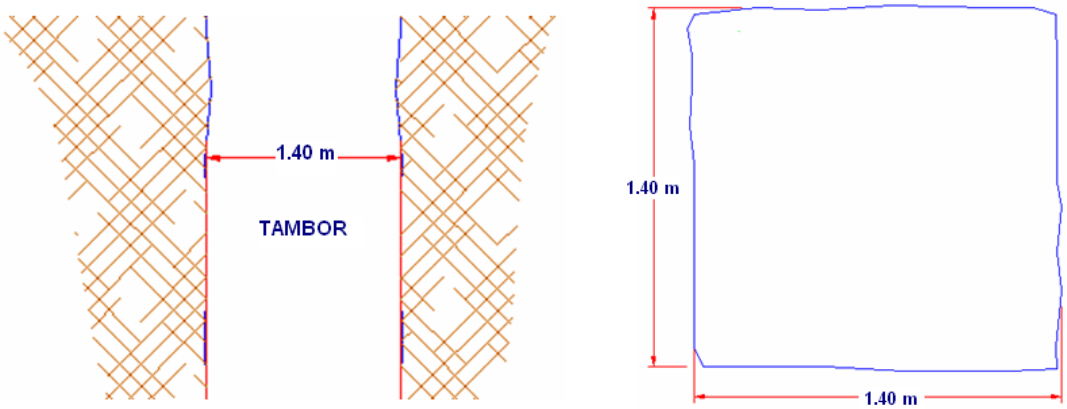

Fig. 30. Vista en planta y perfil de una sección típica de un tambor o chimenea.

- **Inclinados**

El inclinado o clavada es una labor minera avanzada sobre veta y/o material estéril y que permitió la comunicación entre los niveles; sirviendo para acceso de personal, ingreso de suministros y para izar mineral de veta y/o material estéril desde un nivel inferior a otro superior, por medio de un malacate y un *skip* (Fig. 31).

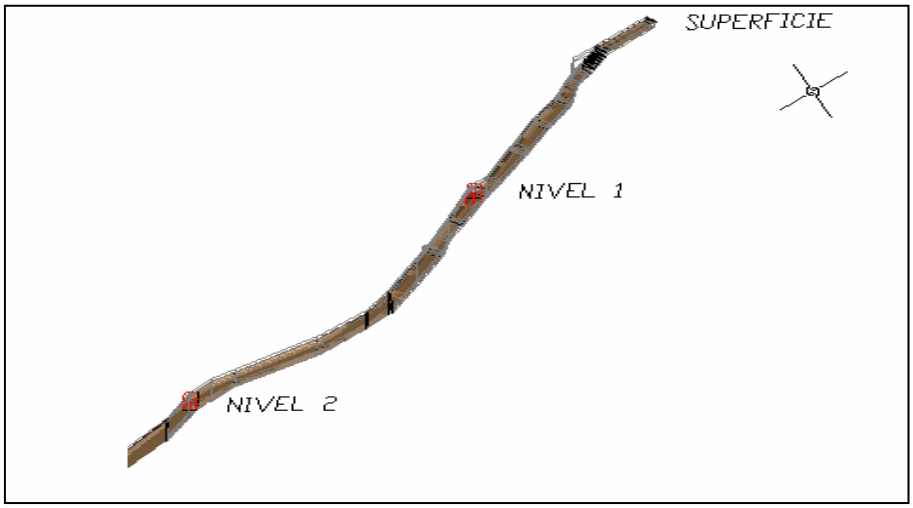

Fig. 31. Vista en perfil de la sección de un inclinado.

- **Labores mineras de explotación**

En la fase de producción se definieron bloques de reservas explotables llamados Paneles, por tres dimensiones: su ancho de acuerdo al espesor de la veta, su alto por la distancia entre dos niveles y su largo por la distancia entre dos tambores, que generalmente está definida por la distancia donde la eficiencia del método que se emplee para la extracción del mineral sea la mejor. En este proyecto, esta distancia en el rumbo fue condicionada por la continuidad geológica de la veta (Fig. 32).

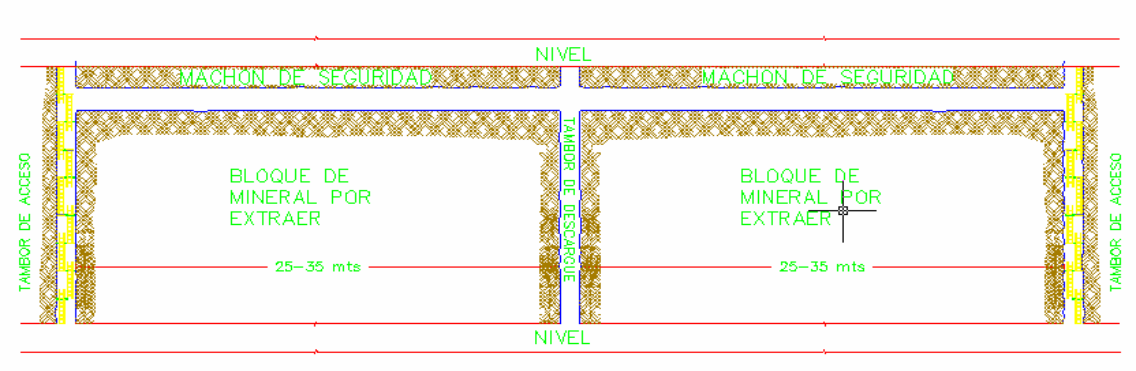

Fig. 32. Vista en sección longitudinal de un panel de explotación de dos flancos.

8.2. Métodos de explotación

Debido a las buenas condiciones de estabilidad y competencia de la roca, el yacimiento de La Ye ha permitido realizar la extracción del material mineralizado mediante los siguientes métodos de explotación que han sido ajustados a las características de la veta.

8.2.1. Corte descendente con sostenimiento de techos

Este método se utilizó cuando los buzamientos de la veta fueron mayores a 50°. Aprovechando la competencia de la roca, se avanzaron los paneles de arriba-abajo y se sostuvieron los techos con madera, soporte metálico y pernos con malla. Los avances se realizaron de 0,80 metros en cada ciclo de voladura, para minimizar problemas de barrenos fallidos, y cada 2 avances se aseguraron los respaldos. (Fig. 33)

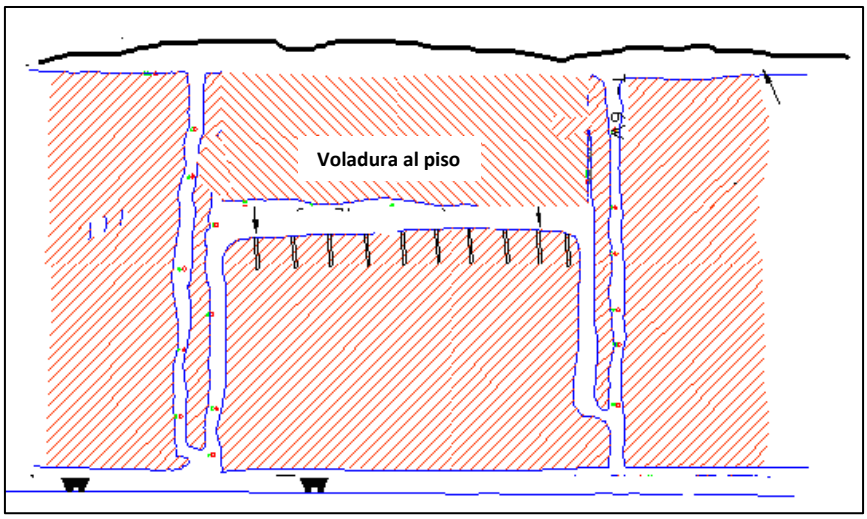

Fig. 33. Esquema del método de explotación de corte descendente utilizado en la mina La Ye.

El método consistió inicialmente en efectuar una sobreguía superior que delimita el inicio de la explotación en el bloque, sostener adecuadamente toda la superficie del techo, ya sea con madera en forma de sostenimiento en escalera y atizado con madera en toda la superficie o el uso de pernos y malla electro soldada, luego se inició la explotación del mineral o material de

veta en sentido descendente para aprovechar la gravedad en lo que se refiere al descuelgue del mineral, el cual fue almacenado temporalmente en las tolvas construidas en la parte inferior donde luego se procedió al descargue de este mineral.

Este método de explotación presenta como ventaja que al irse sosteniendo los respaldos a medida que avanza la explotación, las condiciones de seguridad son óptimas. La desventaja de este método es que su rendimiento puede ser bajo y este está directamente relacionado a la poca longitud de avance por ciclo de perforación y voladura.

8.2.2. Corte y Relleno Ascendente

Este método se utilizó cuando los buzamientos de la veta fueron mayores a 50°. La geometría de los paneles es similar al de corte descendente. Este método permitió explotar mineral en terrenos de diferentes características geomecánicas, pero su empleo está relacionado especialmente a materiales incompetentes y que requieren de grandes esfuerzos para lograr su estabilidad y sostenimiento, que bajo otros métodos sería imposible. Su alto costo de implementación debió ser recuperado con la extracción del mineral.

El desarrollo de este método se define en las siguientes etapas:

Etapa 1: Esta etapa realizó la perforación al techo y primera voladura (Fig. 34).

Etapa 2: Descargue de Mineral (Fig. 35).

Etapa 3: Construcción de Tabiques y Relleno (Fig. 36).

Etapa 4: Preparación para el nuevo ciclo

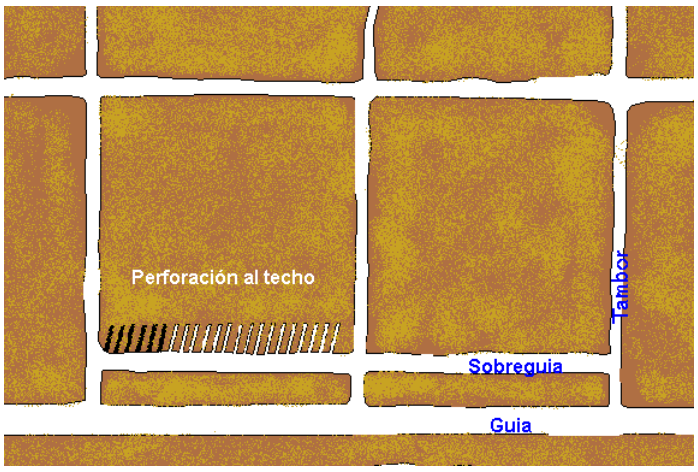

Fig. 34. Primera etapa del ciclo de explotación del método de corte y relleno hidráulico. (Perforación y voladura del techo).

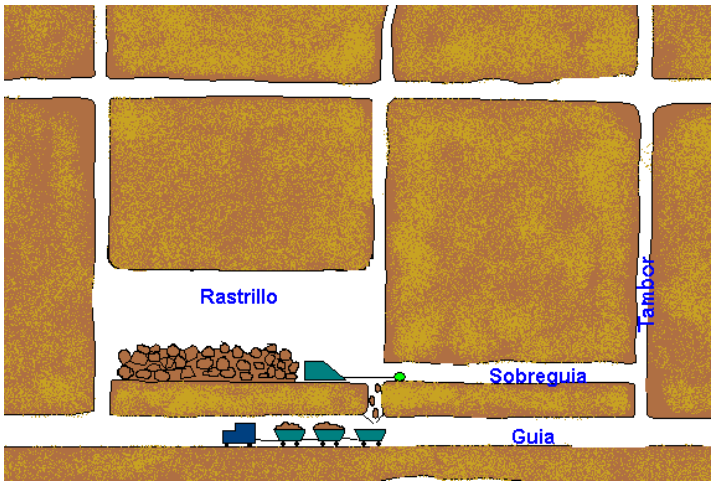

Fig. 35. Segunda etapa del ciclo de explotación del método de corte y relleno hidráulico. (Extracción del mineral, descargue).

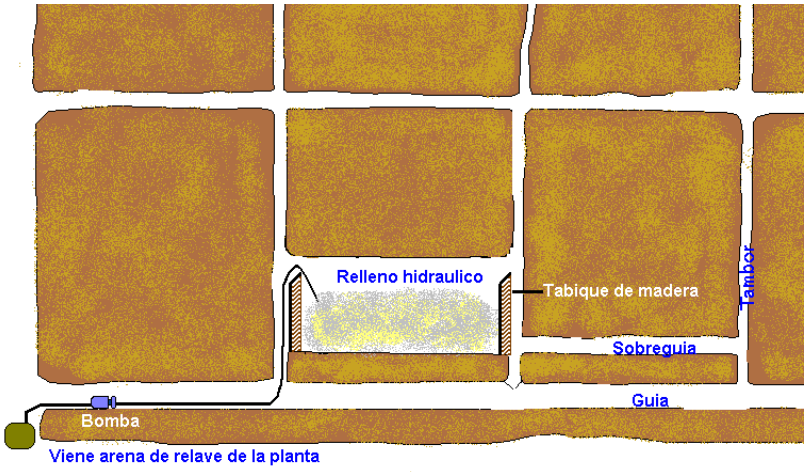

Fig. 36. Tercera etapa del ciclo de explotación del método de corte y relleno hidráulico. (Construcción de tabiques o muros impermeabilizados y relleno con arenas).

8.2.3. Almacenamiento Dinámico

Este método fue empleado donde la continuidad geológica de la estructura tanto en espesor y tenores (g/t) fue claramente definida en todas las dimensiones del bloque de explotación, donde la competencia de la roca era conocida y hace parte de una condición estricta para garantizar seguridad y disminución de la dilución.

Los vacíos dejados por la explotación fueron rellenados con material estéril producto de las mismas labores que se realizaron en el túnel y así dar un buen manejo ambiental a estos residuos sólidos, sin necesidad de ser extraídos hasta superficie. Esta condición fue empleada solamente cuando un bloque de explotación podía llegar hasta el nivel superior y desde este se descargó el estéril hacia el vacío dejado por la extracción del mineral, tal como se observa en las imágenes que explican el método.

Las siguientes figuras (Fig. 37 – 40) muestran las diferentes etapas en este método de explotación.

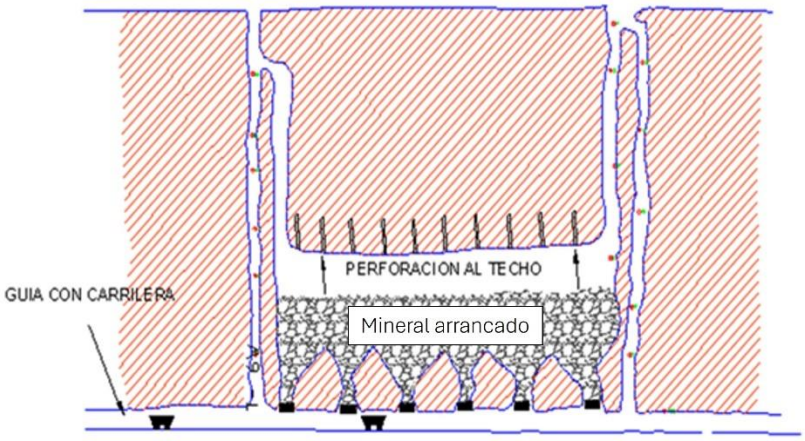

Fig. 37. Primera etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Preparación del bloque, construcción de tolvas e inicio de los ciclos de perforación y voladura).

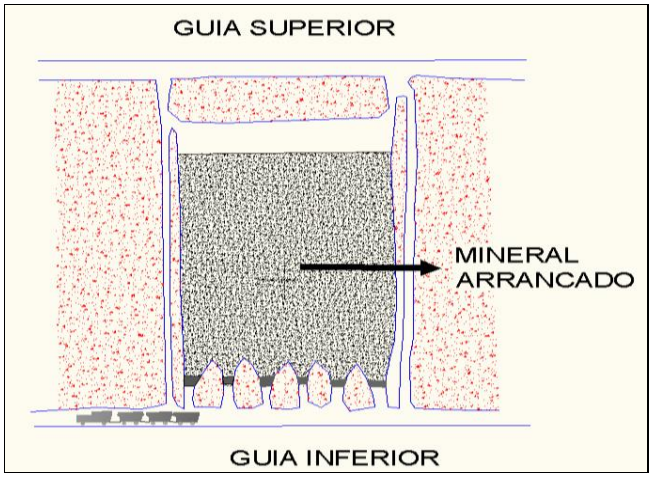

Fig. 38. Segunda etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Se llega hasta el final de la altura del bloque con el mineral arrancado en el piso, se construyen los tambores que comuniquen con el nivel superior para el futuro descargue del estéril).

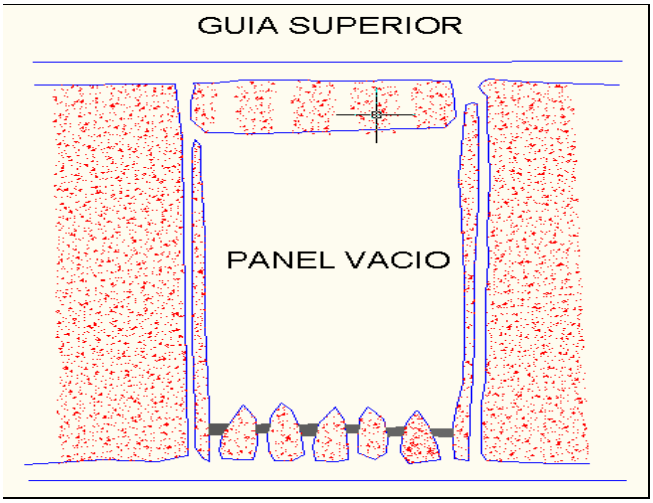

Fig. 39. Tercera etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Extracción del mineral arrancado).

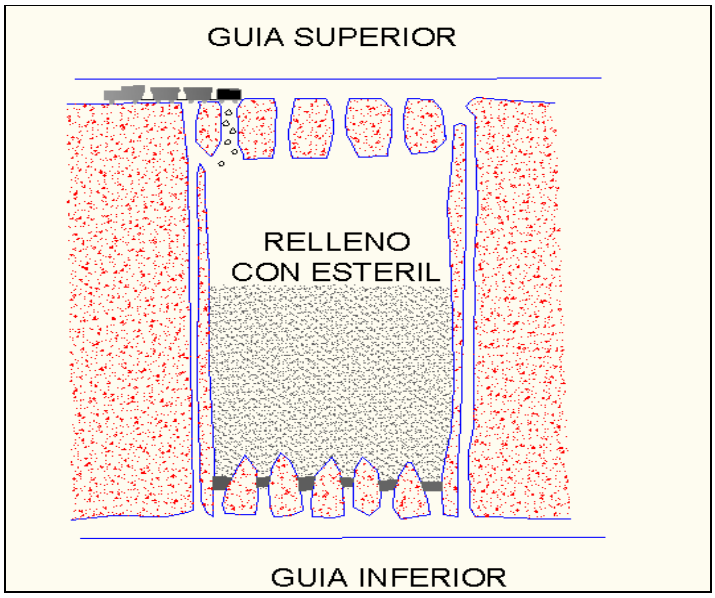

Fig. 40. Tercera etapa del ciclo de explotación del método de almacenamiento dinámico. (Clausura de las tolvas de descargue y relleno con estéril del espacio vacío).

8.2.4. Cámaras y Pilares

Este método se utilizó cuando los buzamientos de la veta fueron menores a 50° y el material arrancado podría presentar dificultades para ser movilizado por la gravedad. Definido el bloque rectangular de mineral por tambores y galerías, a partir de un subnivel base, se divide el bloque en cámaras alternadas con pilares rectangulares de 2 m de ancho. Estas cámaras tienen la dirección del buzamiento y altura que depende de la potencia de la veta. Una vez que la cámara alcanzó el nivel superior, se retornó disminuyendo el ancho del pilar y sosteniendo las paredes para completar el ancho de diseño. Una vez concluida la cámara, la siguiente etapa fue la recuperación de los pilares; al término de éstas, se completó el relleno de los espacios que quedaron. Todo esto se efectuó en retroceso con el fin de garantizar mayor seguridad del personal. (Fig. 41).

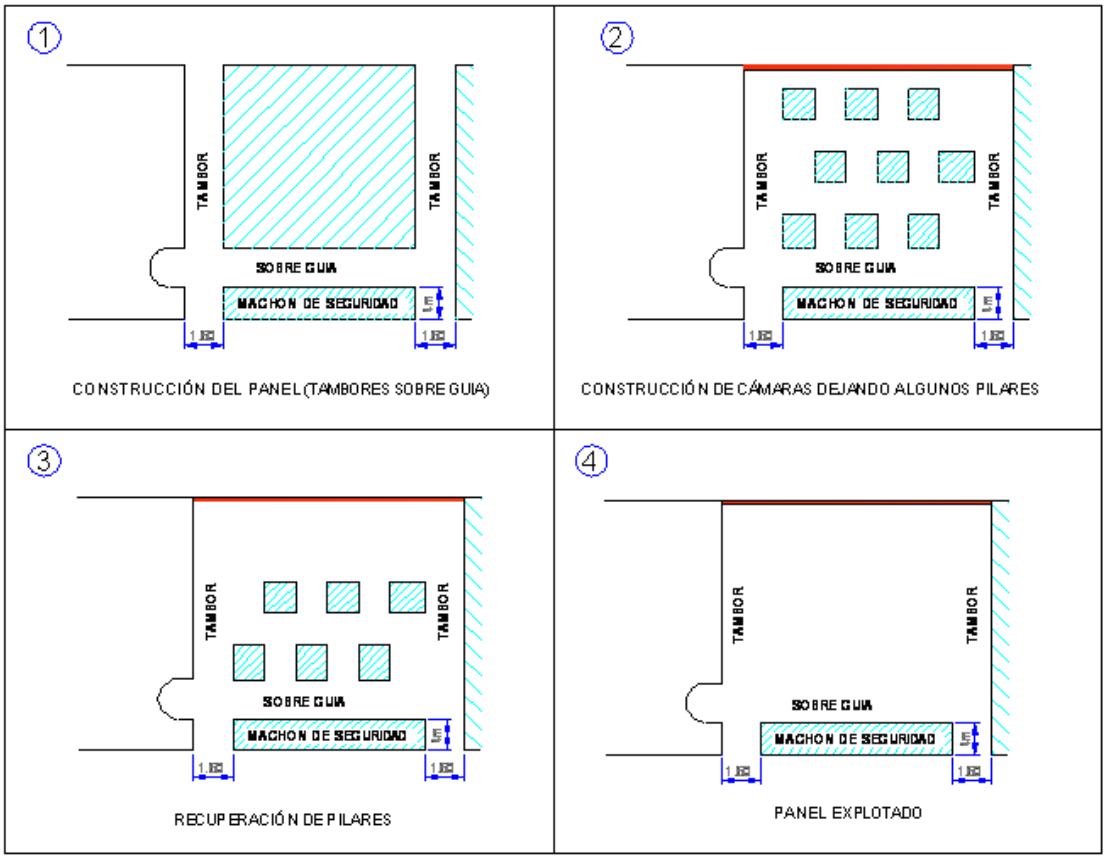

Fig. 41. Etapas del proceso de explotación empleadas según la metodología de Cámaras y Pilares.

8.3. Beneficio y transformación del mineral

La planta de beneficio que se empleó para el beneficio del mineral de la mina La Ye está ubicada en el complejo industrial de La Ye, la cual tiene una capacidad de procesamiento de hasta 400 t/día y en donde se procesa actualmente material mineralizado de otras minas como Cordero y Mangos, todas operadas por la empresa Operador Minera S.A.S. Para el beneficio del material extraído se emplearon los siguientes procesos y su esquema se aprecia en la Fig. 42.

Trituración

El mineral fue transportado desde las plazas de almacenamiento temporal que se ubican cerca de la bocamina principal de extracción hasta la tolva de gruesos de la planta, en volquetas con capacidad de 8 - 10 m^3. La tolva estuvo compuesta por una parrilla de rieles con abertura de 8¨ y de una criba vibratoria tipo Grizzly con parrilla de corte de 1 ½". El material +1 ½" pasó a una trituradora de quijadas de abertura 20" x 36" y –1 ½" juntándose con el anterior luego de ser triturado. El mineral triturado a -1 ½" que representa el 80% cae a una banda transportadora que lo lleva a otra criba vibratoria horizontal de 4' x 8' con abertura de 1".

El material + 1" se llevó a una segunda trituradora (de conos, de corte 4" Standard) que lo redujo a un tamaño de - 5/8" y el retenido de -1" fue a otra trituradora similar que lo redujo a - 1/4".

Todo el material triturado hasta -1/4" se descargó a una tolva a razón de 25 toneladas hora mediante una banda transportadora que finalmente alimento un Molino de Bolas de 7' x 9'.

Molienda, concentración gravimétrica y flotación

El Molino de Bolas 7' x 9' con un motor de 250 HP tiene una capacidad de procesar hasta 400 toneladas-día. La pulpa que descarga el molino de bolas, 80% menor a malla 100, se llevó a concentración gravimétrica en Jigs trapezoidales bajo diferentes variables de operación. El concentrado gravimétrico fue sometido a una concentración centrifuga para recuperar el oro libre, y sus colas se llevaron a una segunda molienda en un molino de bolas Harding de 6' x 36" que generó una pulpa en la descarga a tamaño menor a malla 200 para su posterior cianuración.

Las colas de la concentración gravimétrica, por Jigs, fueron llevadas a flotación bulk de sulfuros con Aerofloat 404 como colector, sulfato de cobre como activador y Aerofrother como espumante. El concentrado de flotación se unió al circuito de remolienda Harding.

El molino Harding operó en circuito cerrado con baterías de hidrociclones de 10" controlando tamaño a malla 200. El *overflow* de los hidrociclones es el material que pasa a cianuración.

Cianuración

El rebose del tanque espesador, que recibe el *overflow* de las baterías de hidrociclones, fue bombeado al tanque de agua industrial mientras que la pulpa espesa a 43% de sólidos se bombea al circuito de cianuración convencional compuesto por 4 agitadores 28' x 30' de doble hélice conectados en serie con tiempo de residencia de aproximadamente 64 horas. En esta etapa se adicionó cal y cianuro para mantener un pH superior a 10,2 y una concentración de cianuro de aproximadamente 250 g/m^3 de solución. También fue necesario inyectar oxigeno de 92% de pureza a los cuatro tanques agitadores por debajo de las hélices.

La descarga del último agitador ingresó a un circuito posterior donde se realiza la recuperación del oro a partir de la solución rica. El tiempo de retención de la pulpa fue de aproximadamente 3,3 horas.

Precipitación

Existen varios métodos para recuperar el oro de la solución rica, dos son los principales, el Merrill-Crowe, que es usado en esta planta y el de absorción con carbón. En el proceso Merrill-Crowe se agrega zinc en polvo y sales de plomo a la solución. El oro se reduce y precipita, y el zinc en polvo pasa a solución (se oxida) y se combina con el cianuro generando el llamado "cianuro estéril" o *barren solution*. El precipitado se funde para obtener el oro, dejando un descarte o "slag material" que contiene metales pesados. Estas colas se descargan habitualmente en las pilas de desecho o presa de relaves.

La solución rica obtenida en la planta de cianuración se bombeó a un tanque clarificador y se hizo circular por filtros clarificadores de hojas para eliminar los sólidos en suspensión. La solución rica clarificada se bombeó a una torre desaereadora a fin de eliminar el oxígeno disuelto, se agregó polvo de zinc a la solución rica desaereada y esta fue bombeada a filtros

prensa donde se colectó el precipitado de oro y plata.

La solución estéril resultante fue muestreada para luego ser enviada al sistema de destrucción de cianuro y finalmente a las presas de relaves.

Fundición

El precipitado seco y frío se mezcló con los fundentes necesarios, Bórax y Carbonato de Sodio, y se cargó a dos hornos de inducción. Se requieren cerca de 2 horas para que la carga se funda completamente y llegue a una temperatura de 1300°C aproximadamente, con el fin de realizar las escorificaciones y la colada final para obtener las barras Doré. Se utilizó el sistema de colada en cascada para la obtención de las barras. Las barras de Doré obtenidas son limpiadas, enumeradas y guardadas en la bóveda hasta el momento de su despacho.

Las escorias producidas se tratan para recuperar el poco de material valioso que pudieran contener, para ello se procesaron en un circuito de trituración y se tamizaron a una granulometría inferior a 20 mallas para pasarla por una mesa gravimétrica. El concentrado obtenido se fundió nuevamente con el siguiente lote. La recuperación promedio fue de 98.7% para el oro y de 37.5% para la plata.

Destrucción de Cianuro

Para el control de la concentración del cianuro de sodio en solución de la pulpa de los residuos de cianuración, se aplicó el método de destrucción de cianuro, mediante el uso del ácido de Caro o ácido peroxosulfúrico. La reacción se realizó en la tubería de relave que conduce la pulpa desde la planta hasta las presas de relaves. La producción de ácido de Caro se genera in situ, mediante la reacción del ácido sulfúrico concentrado con peróxido de hidrógeno al 50%. La reacción se lleva a cabo en un mezclador en línea sumergido en un baño de agua para remoción del calor de la reacción. Los consumos de ácido y peróxido de hidrogeno son del orden de 1,34 y 0,4 Kg. /tonelada de relave, respectivamente. Este sistema permite reducir la concentración de cianuro total a los límites permisibles.

El agua almacenada en el depósito de relaves junto con la solución tratada con este ácido, después de la decantación de los residuos de la cianuración (relaves) fueron recirculadas al proceso metalúrgico, por lo que no existe descarga a ningún cuerpo receptor de las operaciones y procesos de la planta de beneficio.

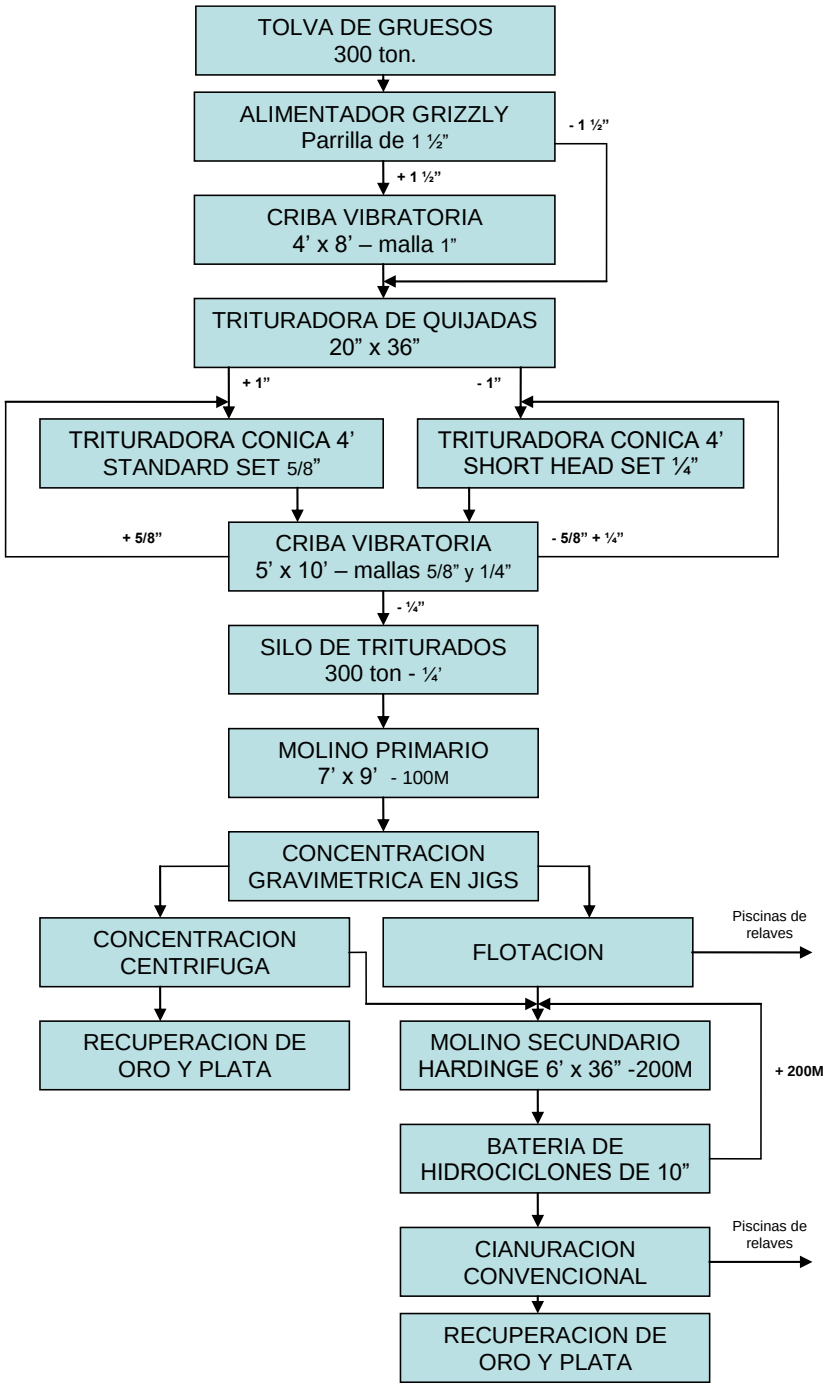

Fig. 42. Diagrama de flujo proceso de beneficio del oro.

9. ASPECTOS FINANCIEROS, SOCIALES Y AMBIENTALES

9.1. Entorno económico. Perspectivas de la economía en Colombia relacionadas con el proyecto La Ye

Las proyecciones económicas para los estudios de factibilidad y viabilidad de la explotación de la mina La Ye se basaron en el precio del oro entre los años 2000 - 2010 y las proyecciones de crecimiento de este *commodity*, así como los índices de inflación, valor de precio del dólar, entre otras variables macroeconómicas.

Se resumen los principales aspectos financieros y económicos colombianos y mundiales y el panorama económico del oro al final de la década de los 2000

Las variaciones en la producción de oro en Colombia desde 2010 hasta la fecha se resumen en Tabla 1 .

Tabla 1 producción de oro en Colombia (en MT/a)

Año de Producción	Toneladas Mt
2010	53.6
2011	55.9
2012	66.1
2013	55.7
2014	57.8
2015	59.5
2016	61.8
2017	41.9
2018	35.6
2019	36.6
2020	47.6
2021	53.6
2022	55
2023	57.2

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

Estos datos reflejan fluctuaciones en la producción de oro en el país, influenciadas por factores como precios internacionales, políticas mineras y condiciones económicas internas. Es importante destacar que Antioquia se ha consolidado como el principal departamento productor de oro en Colombia, registrando cifras superiores a 10.000 kilogramos en 2022, muy por encima de otros departamentos como Chocó, Nariño, Bolívar, Cauca y Caldas.

En cuanto a la producción de mina La Ye en 2020 fue de aproximadamente 24.000 onzas de oro, en 2021 la producción fue de 23.115 onzas y para 2022, la compañía alcanzó una

producción de 32.340 onzas de oro equivalente (AuEq).

Los porcentajes de participación de mina La Ye con respecto a la producción nacional de oro se incluyen en **Tabla 2** Puede verse que la participación en general es pequeña.

Tabla 2 *Participación de La Ye en la producción nacional de oro*

Año	Producción de Colombia (Oz)	Producción de Mina La Ye (Oz)	Porcentaje de Mina LA Ye respecto a Colombia (%)
2018	1.144.566	17.000	1,49%
2019	1.176.716	16.000	1,36%
2020	1.530.374	24.000	1,57%
2021	1.723.279	23.115	1,34%
2022	1.768.290	32.340	1,83%

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), PTO Mina La ye

9.1.1. Relación precio oro vs. inflación

El valor del mineral se incrementó todos los años durante 2000 - 2010, y en 2011 aumentó más del 20% con relación a 2010. Esta tendencia alcista motivó que los inversionistas mundiales, en un ambiente inflacionario se resguardaran principalmente en el oro, que se mueve como el primer eslabón de una cadena de indicadores y reacciona de forma sensible y adelantada como un indicador del desarrollo de la inflación. (Acción Latina,2024)

El oro se convirtió en una inversión segura y confiable frente a la alta volatilidad de los mercados financieros registrada en los ciclos económicos entre 2000-2010 y si el oro no logró mayores alzas se debió a una combinación de la fortaleza del dólar, especulación y necesidad de liquidez de los mercados de futuros y los fondos de inversión.

9.1.2. Análisis del sector industrial. Sector minero colombiano. (Atractivo del sector y factores claves de éxito en el mismo)

Según la Asociación Nacional de Industriales (ANDI) la contribución del sector minero-energético al Producto Interno Bruto (PIB) pasó de 8.300 millones de dólares en el año 2000 a más de 45.000 millones en el 2011, para alcanzar 12,5% del total de bienes y servicios producidos en el país. Los sectores de minas y canteras registraron una muy buena dinámica a lo largo de la década del 2000, al observarse un crecimiento promedio de 6,5 por ciento, frente a 4,3 por ciento del total de la economía. El sector minero representaba el 33,7% de las exportaciones colombianas para el 2010 y las expectativas de crecimiento eran bastante favorables, dada la tendencia creciente en precios (**Tabla 3**)

Tabla 3 . Exportaciones de oro de Colombia 2010 y 2011. Tomada de DANE.gov.co.

				Millones de dólares FOB
Sector	**2010**	**Part(%)**	**2011**	**Part(%)**
Total Exportaciones	39.82	100,00	51.179	100,00
Sector agropecuario, ganadería, caza y silvicultura	2.147	6,09	2.119	4,14
Sector minero	19.147	33,69	28.054	54,81
Sector industrial	18.446	59,92	20.867	40,77
Demás sectores	80	0,30	140	0,27

9.1.3. Estudio de mercados y precio

Para el 2010 el oro se destacaba como una opción de inversión muy atractiva, y como refugio en los momentos de incertidumbre y comportamientos alcistas.

En términos generales, las inversiones en oro y en otros metales preciosos, han sido usadas como seguros contra la inflación y la devaluación de las monedas. Cuando las economías detectan que los rendimientos generados por acciones, títulos valores, bonos e incluso bienes raíces no compensan el riesgo y la inflación, siempre aumentan su demanda en inversiones alternativas tales como la del oro

Hacia finales de la década del 2000 y después de que la economía mundial hubiese experimentado un periodo de incertidumbre financiera caracterizado por la burbuja inmobiliaria del año 2008 con sus implicaciones negativas hacia los años posteriores, la subida del valor del metal anunció que la liquidez mundial registraba un fuerte crecimiento. El papel del dólar como divisa de reserva estaba en grave riesgo y la crisis financiera mundial fue mucho más grave de lo que inicialmente se contempló. Hacia el año 2010 se consolida un gran ciclo alcista en el valor del oro con grandes similitudes al que tuvo lugar en los años 70.[1] En el 2009, el oro superó una y otra vez su máximo histórico, registrando valores por encima de los USD 1.000 la onza. La tendencia alcista continuó durante 2010 y en julio de 2011, el precio supero los 1.618 dólares por onza, con una variación alrededor del 14%, OroyFinanzas. (2009, enero 1)

9.2. Análisis financiero del proyecto La Ye

El tenor o contenido del mineral en la veta La Ye, registró en promedio 7.0 gramos de oro por tonelada de material en veta para las reservas que se tenían hacia el año 2010, que eran alrededor de 400.000 toneladas de mineral entre reservas probadas y probables. Adicionalmente se tenían recursos por el orden de las 500.000 toneladas entre medidos, indicados e inferidos, los cuales dependiendo de los trabajos adicionales de exploración se convertirían en reservas.

[1] En 1971 el precio del oro pasó de 50 dólares la onza hasta los USD 200 en 1974. Entre 1974 - 1977 el oro había corregido/consolidado su precio hasta el nivel de los USD 100. Más de un inversor abandonó sus posiciones El oro alcanzó su máximo histórico de USD 850, en enero de 1980. Este valor, ajustado por inflación, situarían el precio del oro en los USD 2.200.

Para el inicio de la operación se estimó una extracción de mineral de aproximadamente 300 a 350 toneladas por días con una meta mensual de 10.000 toneladas extraídas y procesadas para un valor estimado de 120.000 toneladas al año. Respecto a las onzas de oro se estimaba una producción de alrededor de 2.000 Oz mes, para una producción estimada de 24.000 onzas al año (ver **Tabla *4***). Bajo estas perspectivas se estimó una vida útil de la mina (LOM: Life of mine) La Ye basado en las reservas de 4 años. Los recursos con los cuales contaba la mina para el año 2010 permitían extender la vida útil en aproximadamente 2.2 años adicionales, por lo que en un principio se estimó una vida útil de 6.2 años. (información extraída del documento PTO de la Mina La Ye).

Tabla 4. Estimación de recursos y reservas para la mina La Ye en el año 2010.

	Valor	Tenor	Oz estimadas	Oz Recuperadas (86%)	LOM
Reservas	500,000	7.0	112,528	96,774	4
Recursos	340,000	5.5	60,122	51,705	2

Para el análisis de la viabilidad financiera, se tomaron los parámetros que se resumen en la Tabla5. La moneda base para la valoración fue el dólar (USD). El 100% de las ventas de Operadora Minera S.A.S son exportaciones.

De acuerdo al análisis financiero realizado, se determinó que la extracción de los recursos del proyecto La Ye era viable y cumplió con las expectativas de la empresa, generando un valor presente (2010) neto de utilidad de cada Oz cercano a los 500 dólares.

Tabla 5 Parámetros de evaluación para la viabilidad del proyecto La Ye en el año 2010.

Precio onza de Oro	1600
Tenor oro (gr / ton)	7
Recuperación Oro	86%
Producción día (toneladas)	300
Impuestos	33%
Onzas Oro para producir año	24000
Costo de producción ton (Planta)	28
Costo de producción ton (Mina)	92
TRM	1800
Costo de cada onza	725
Regalías	4,00%
Impuesto de Renta	33%
Inflación Proyectada	3%

Entre los años 2017 – 2018 la producción de la mina La Ye se redujo significativamente (cerca del 50%) y posteriormente inicio su etapa de agotamiento de reservas. En la actualidad el

proyecto La Ye se encuentra en la etapa de recuperación final de machones y cierre de la mina. Dado el carácter confidencial, no se cuenta con información directa de la Empresa, pero según datos de cálculo y proyecciones, se puede estimar que de la mina La Ye, se extrajeron entre 180,000 y 200,000 onzas de oro.

9.3. Aspectos ambientales

En este capítulo se describen brevemente los principales aspectos de ambientales relacionados con el desarrollo del proyecto minero La Ye.

9.3.1. Dimensión Física

Climatología

El área de influencia se ubica en el Municipio de Zaragoza, el cual se localiza en la zona climática de la serranía de San Lucas, cuyos patrones climáticos corresponden a la región Caribe, aunque con influencia de la región Centroandina. Esta región se caracteriza por precipitaciones superiores a los 3.000 mm anuales y temperaturas medias por encima de los 24 ºC. El análisis de los datos de precipitación (obtenidos de estaciones del área de influencia), mediante la ponderación de las áreas representativas de cada estación (polígonos de Thiessen), indican un valor medio de 4.240 mm de lluvias anuales para el Municipio de Zaragoza, con mayores niveles de precipitación hacia los sectores central y norte del Municipio, donde puede superar los 4.470 mm, sector donde se localiza el proyecto La Ye.
Según los registros obtenidos por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en la Estación Climatológica Santa Margarita (próxima al extremo Nororiental del Municipio de Zaragoza), puede estimarse en 27.6 °C la temperatura media en la planicie aluvial, con valores medios máximos y mínimos de 36 °C y 20.2 °C respectivamente, registros similares son reportados por la estación de Mineros S.A., que establece una temperatura mínima de 22.6 °C, media de 28.6 °C y máxima de 37.2 °C.

Hidrología

Todos los drenajes del área de influencia pertenecen a la hoya hidrográfica del río Nechí, la cual está compuesta en parte por la cuenca del río Tigüí, (su principal río tributario junto con el río Porce) que cruza en su recorrido final el área directa del proyecto en el costado oriental. La quebrada San Pedro a su vez, forma parte del sistema hidrológico del río Tigüí, la cual cruza los bloques mineros "La Ye" que desemboca sus aguas en el río Tigüí en la margen izquierda, en la zona oriental del proyecto. Igualmente, las quebradas Cordero y La Olaya pertenecen a la cuenca del río Tigüí, las cuales cruzan el bloque Cordero; la quebrada Cordero pasa por el costado oriental en sentido sur – norte y La Olaya cruza el bloque en el costado sur occidental en sentido sur – noroccidente.

Geomorfología

La geomorfología del área de influencia se determinó de acuerdo con la metodología utilizada para elaborar el Mapa Geomorfológico, de Amenazas y Áreas degradadas de la Jurisdicción de Corantioquia, basada en los trabajos de Alberto Arias (1995).

En esta metodología se distinguen relieves de primer orden, representados por las unidades de relieve que son aquellas que presentan las mismas características morfogenéticas y que pueden sufrir modificaciones morfológicas secundarias leves, moderadas o intensas sin perder su identidad estructural y que en conjunto definen la estructura morfológica básica de las cadenas montañosas (Arias, 1995).

La mina La Ye se encuentra localizada en la unidad de relieve denominada como el Frente Erosivo del Cauca Nechí.

Suelos

En el área de estudio se localizan las asociaciones Tarazá, Cáceres y Zaragoza. En general los tres perfiles muestreados en el área de influencia directa presentan acidez muy fuerte. Esta condición favorece la solubilización de aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn), los cuales pueden llegar a ser tóxicos para algunas especies vegetales. Con las condiciones de acidez que presentan estos suelos se espera que el P sea fijado por los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, limitando su disponibilidad para las plantas. (información extraída del documento PTO de la Mina La Ye).

9.3.2. Dimensión Biótica

Componente flora

Según algunos sistemas de clasificación de grupos y categorías de coberturas como los propuestos por el instituto Humboldt y por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC 1994), las coberturas identificadas en el área de estudio se enmarcan en los grupos de bosques (B), rastrojos (R) y pastizales (P). Dentro de cada grupo se identificaron también varias categorías que se resumen en la **Tabla *6***.

Los ecosistemas identificados en el área de estudio, como los bosques, rastrojos (arbustales) y pastizales o herbazales, desempeñan un papel crucial en el mantenimiento del equilibrio ecológico y la provisión de diversos servicios ecosistémicos. A continuación, se detallan las importancias de estos ecosistemas:

- Bosques: Los bosques son ecosistemas clave para la biodiversidad y el bienestar humano. En el caso de los tres tipos de bosques identificados (baja, media y alta intervención), cada uno tiene un impacto diferente en el medio ambiente:
  Biodiversidad: Los bosques albergan una gran diversidad de especies animales, vegetales y microorganismos. Son habitas naturales para muchas especies, incluidas algunas en peligro de extinción.
  Secuestro de carbono: Los bosques actúan como sumideros de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático al absorber dióxido de carbono de la atmósfera.
  Ciclo del agua: Los bosques regulan el ciclo hidrológico, capturando y liberando agua,

lo que ayuda a prevenir inundaciones y sequías.

Protección del suelo: Ayudan a prevenir la erosión del suelo mediante la retención de la capa superficial y la estabilización del terreno.

- Rastrojos (arbustales) Los rastrojos, que incluyen áreas de vegetación arbustiva, son ecosistemas intermedios que juegan un papel importante en la regeneración natural y en la estabilización de los suelos:

  Restauración ecológica: Los rastrojos son frecuentemente etapas en la sucesión ecológica, lo que significa que pueden ser un paso importante hacia la regeneración de bosques u otros ecosistemas más maduros.

  Biodiversidad: Aunque los rastrojos no tienen la misma diversidad que los bosques, aún ofrecen refugio y alimento a una variedad de especies, incluidos insectos, aves y pequeños mamíferos.

  Captura de carbono: Los rastrojos contribuyen al almacenamiento de carbono en la vegetación y el suelo, ayudando a mitigar el cambio climático, aunque de manera menos eficiente que los bosques maduros.

- Pastizales o Herbazales Los pastizales son ecosistemas dominados por hierbas y plantas herbáceas. Tienen una importancia particular en áreas rurales y de uso agrícola:

  Suministro de alimentos: Los pastizales son fundamentales para la ganadería, ya que proporcionan pasto para el ganado. Además, las especies herbáceas son esenciales para la alimentación de especies animales silvestres.

  Conservación de suelos: Ayudan a evitar la erosión del suelo, especialmente en áreas donde la vegetación herbácea cubre grandes extensiones.

  Regulación del clima: Al igual que los rastrojos, los pastizales también juegan un papel en el secuestro de carbono, aunque generalmente de menor magnitud que los bosques.

Tabla 6 Parámetros de evaluación para la viabilidad del proyecto La Ye en el año 2010.

Grupo de cobertura	Categoría de cobertura	Símbolo
Bosque	Bosque con baja intervención	B1
	Bosque con media intervención	B2
	Bosque con alta intervención	B3
Rastrojos (arbustal)	Rastrojo alto	RA
	Rastrojo bajo	RB
Pastizal o herbazal	Pastizal arbolado denso	PA1
	Pastizal arbolado ralo	PA2
Sin cobertura	Zonas Erosionadas	EE
	Zonas Minería	EM
Misceláneo	Rastrojos y bosques	M3

Fig. 43 *Bosque con baja intervención*

Fig. 44 *Bosque con alta intervención*

Fig. 45 *Zonas Minería*

Componente Fauna

La región se ubica entre la planicie del río Cauca y las estribaciones de la serranía de San Lucas. Presenta planicies aluviales y colinas con sitios de antiguos depósitos aluviales traídos por el río Cauca y sus afluentes, entre los que se destaca el río Nechí.

Con estas condiciones fisiográficas se conforma un paisaje con dos unidades básicas: llanuras y colinas, las primeras hacia el río Nechí y sus afluentes son en su mayoría inundables y las segundas en terrenos más altos que permanecen secos. Esta configuración del paisaje permite la configuración de hábitats diversos con oferta variada de recursos para fauna.

El área de estudio corresponde a la provincia biogeográfica Chocó – Magdalena, distrito Nechí. Es una zona de intercambio con los valles interandinos del alto Cauca y Magdalena, ubicada dentro del centro de endemismo Nechí – Nare en el que se ubican especies endémicas como el *primate Saguinus leoucopus* (titi) y el *Sciurus granatensis valdiviae* (Ardilla), restringida a Nechí. En aves se *reportan Gymnopithys bicolor ruficeps, Myrmeciza laemostricta palliata Todd, Melaherpes chrysauchen pulcher Scaleter, Capito hypoleucus Salvin y Microbases cinereiventris magdalenae.*

En el área de influencia directa se ubicaron un total de 20 especies de mamíferos entre observados y reportados. Dichas especies se encuentran distribuidas en 6 Órdenes y 15 Familias.

El Orden que presentó mayor abundancia fue el de los roedores con 7 especies, seguido de los carnívoros con 5, mientras que los órdenes menos abundantes fueron los marsupiales y los lagomorfos (conejos). La máxima representación de especies por familia que se presentó fue de 2 especies, y esto ocurrió en un grupo de 5 familias (Muridae, Sciuridae, Canidae, Cebidae y Dasypodidae), el resto de las familias (10) estuvo representado sólo por una especie.

Se reportan un total de 102 especies de aves entre observadas y reportadas para la zona de estudio. Dichas especies se encuentran distribuidas en 15 Órdenes y 36 Familias. Los Órdenes con mayor representatividad fueron Passeriformes con un total de 46 especies, seguido del Apodiformes con 12 especies. Por su parte los Órdenes con menor representatividad fueron Coraciformes, Charadriformes y Gruiformes con una especie cada uno.

Se reportan un total de 30 especies de herpetos, que pertenecen a 3 órdenes y 13 Familias. El orden con mayor representatividad fue Squamata con 25 especies, seguido de Testudinata con 4 y Crocodylia con 1 especie. Hay que tener en cuenta que el Orden Squamata comprende tanto los lagartos (Saurios), como las serpientes (Serpentes) (corantioquia.com.gov - ALIANZA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE E INCLUYENTE, LA RECONCILIACIÓN Y EL BUEN GOBIERNO EN MUNICIPIOS DE ANTIOQUIA)

En la región del Bajo Cauca antioqueño, no se ha identificado ninguna **especie endémica en peligro de extinción** o con alguna **categoría de conservación** como "en peligro" o "vulnerable" según las listas oficiales de conservación, como la **UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza)** o las leyes ambientales nacionales. Aunque algunas especies locales podrían estar en riesgo debido a la degradación del hábitat

9.3.3. Impactos ambientales

En la **Tabla *7*** se presentan los impactos relacionados con el desarrollo del proyecto minero de La Ye y su importancia ambiental.

Tabla 7 Impactos identificados e importancia ambiental

Impactos dimensión física	Irrelevantes	Moderados	Severos	Críticos
Cambios en la calidad fisicoquímica del agua		**X**		
Afectación de la dinámica de aguas superficiales		**X**		
Afectación de la dinámica de aguas subterráneas		**X**		
Emisión de material particulado y de gases		**X**		
Generación de ruidos		**X**		
Activación de procesos erosivos		**X**		
Movimiento del macizo rocoso y hundimiento del terreno		**X**		
Contaminación del suelo		**X**		
Impactos dimensión biótica	**Irrelevantes**	**Moderados**	**Severos**	**Críticos**

Impactos dimensión física	Irrelevantes	Moderados	Severos	Críticos
Remoción y perdida de cobertura vegetal		**X**		
Afectación de comunidades faunísticas		**X**		
Impactos dimensión social	**Irrelevantes**	**Moderados**	**Severos**	**Críticos**
Generación de expectativas		**X**		
Afectación del patrimonio cultural		**X**		
Modificación del paisaje		**X**		
Cambios en los niveles de gobernabilidad		**X**		
Alteración de la dinámica poblacional y espacial		**X**		
Generación de empleo local			**X**	
Cambio en el uso del suelo		**X**		
Incremento en el presupuesto municipal			**X**	
Afectación de infraestructura pública y privada		**X**		
Incremento en la demanda de bienes y servicios		**X**		
Modificación en el valor de la tierra		**X**		

Fuente: Rubio, J. (2025)

9.3.4. Plan de Manejo Ambiental

En la **Tabla *8*** se muestran de manera resumida los planes de manejo formulados relacionados con los impactos posibles del desarrollo del proyecto minero.

Tabla 8. Programas de manejo para los impactos ambientales del proyecto La Ye.

Programa	Objetivo	Impacto de la acción minera	Momento de ejecución
Dimensión física			
	Asegurar la preservación, el control y la mitigación de los impactos causados sobre el entorno físico – biótico por los residuos sólidos generados durante la construcción, montaje y operación de la Mina La Ye. Crear una conciencia ambiental del manejo de residuos sólidos en el personal que laborará en la mina: minimización, separación y reciclado de residuos.	Contaminación de agua, suelo y aire. Alteración del paisaje.	Construcción, montaje arranque, cierre.
Abastecimiento de agua.	Garantizar el suministro permanente de agua para los procesos mineros y demás labores, según las concesiones de aguas otorgadas.	Afectación de cuerpos de agua. Alteración de la calidad fisicoquímica del agua.	Construcción, montaje y arranque.
Manejo de aguas residuales domésticas .	Ejecutar la operación y el mantenimiento de los sistemas sépticos que tratan las aguas residuales domésticas de la mina La Ye, para cumplir con la normativa nacional pertinente y minimizar el impacto sobre las fuentes receptoras y el suelo.	Cambios en la calidad fisicoquímica del agua.	Construcción y montaje, perforación y voladura, patios de acopio y disposición.
Manejo de emisiones atmosféricas y ruido ambiental.	Disminuir la contaminación atmosférica generada por la emisión de gases, material particulado y ruido generado en los procesos beneficio y transformación. Se han implementado tecnologías de aislamiento acústico, así como el uso de equipos de bajo ruido, en cuanto al material particulado se han instalado sistemas de	Afectación en la calidad del aire y afectación acústica.	Construcción y montaje, perforación y voladura, transporte y disposición en patios de acopio.

Programa	Objetivo	Impacto de la acción minera	Momento de ejecución
	filtración en los procesos de transformación con el fin de capturar partículas finas.		
Manejo de sustancias químicas.	Establecer el adecuado manejo y almacenamiento de los materiales, equipos e insumos necesarios para la operación de la mina, de forma tal que se controlen los impactos que se puedan generar sobre el ambiente. Proteger a las personas en la manipulación ordinaria, incidentes o accidentes con las sustancias químicas y peligrosas.	Cambios en la calidad fisicoquímica del agua. Alteración de las propiedades fisicoquímicas del suelo.	Construcción y montaje, perforación y voladura, disposición de escombros y transporte interno.
Manejo de vías.	Mantener los accesos internos de la mina, en buenas condiciones, evitando al máximo su deterioro.	Sedimentación en cuerpos de agua. Cambios en la calidad fisicoquímica del agua. Afectación de la dinámica de cuerpos de agua. subterráneos y superficiales. liberación de material particulado debido al transporte.	Construcción y montaje y transporte.
Manejo de aguas residuales industriales (relaves).	Preservar y mitigar los impactos causados sobre el entorno físico – biótico durante las actividades de operación cierre de la Mina La Ye.	Contaminación de agua, suelo y aire, La contaminación del agua se debe al drenaje ácido de mina, causado por la reacción de minerales sulfurosos con el agua y el oxígeno. Alteración del paisaje.	Construcción, operación, cierre.
Dimensión biótica			
Cercamiento de zonas protectoras y enriquecimiento de especies.	Favorecer el desarrollo de la regeneración natural y enriquecimiento de especies en las zonas cercadas, para mejorar la oferta de hábitat a la fauna de la zona. Ampliar el área de parches boscosos (bosque y rastrojo alto) y favorecer su conectividad.	Remoción y pérdida de cobertura vegetal. Afectación de comunidades faunísticas.	Construcción, operación, cierre y abandono.
Establecimiento de bosque protector-productor.	Establecer un bosque protector-productor para el abastecimiento de madera a largo plazo del proyecto. Favorecer la conectividad de parches boscosos.	Remoción y pérdida de cobertura vegetal Afectación de comunidades faunísticas.	Construcción y operación.
Dimensión social			
Contratación de mano de obra local.	Lograr que la población del municipio de El Bagre, Zaragoza y de las veredas aledañas a la mina, provean mano de obra calificada y no calificada que puedan ser instruidas o capacitadas sobre la marcha para asumir cargos que exigen mayor calificación.	Generación de expectativas. Generación de empleo. Incremento en la demanda de bienes y servicios.	Construcción y montaje. Arranque, transporte y almacenamiento. Beneficio.

Programa	Objetivo	Impacto de la acción minera	Momento de ejecución
Veeduría para el manejo de las regalías.	Conformar una veeduría para el manejo de las regalías y para observar y analizar las actuaciones de los funcionarios de la Administración Municipal. Fortalecer las instituciones involucradas con este mecanismo democrático de representación para ejercer la vigilancia sobre el proceso de la gestión pública.	Incremento en el presupuesto municipal. Generación de expectativas. Cambios en los niveles de gobernabilidad.	Arranque, transporte y almacenamiento. Beneficio. Venta de oro.
Negociación de predios y servidumbres.	Continuar con el programa de negociación de predios y servidumbres bajo los lineamientos ya establecidos por Operadora minera S.A.S y avalados por su departamento jurídico.	Incremento en el valor de la tierra Generación de expectativas.	Construcción y montaje. Arranque, transporte y almacenamiento. Beneficio. Cierre y abandono.
Información y Participación Comunitaria .	Crear y fortalecer espacios de diálogo para informar de manera clara veraz y oportuna a las comunidades, así como a las instituciones y autoridades municipales, ONG´s y entidades con pertinencia en la zona, sobre las actividades de la Empresa, los criterios de gestión ambiental, el manejo del empleo, el pago y uso de regalías e impuestos, y las medidas propuestas para el manejo de impactos derivados de la operación de la mina de acuerdo con la política ambiental y las disposiciones legales vigentes.	Generación de expectativas. Generación de empleo. Afectación del patrimonio cultural. Cambios en los niveles de gobernabilidad. Alteración de la dinámica poblacional y espacial. Afectación de la infraestructura pública y privada.	Construcción y montaje. Arranque, transporte y almacenamiento. Beneficio. Cierre y abandono.
Memoria y patrimonio cultural.	Formular y aplicar una serie de programaciones alrededor de la memoria y el patrimonio cultural local con los referentes y patrones culturales propios y con el máximo de respeto y admiración por las culturas campesinas y étnicas, como medida para contrarrestar los efectos que culturas extrañas puedan realizar sobre los referentes y las culturas locales.	Generación de expectativas. Afectación del patrimonio cultural. Alteración de la dinámica poblacional y espacial.	Construcción y montaje. Arranque, transporte y almacenamiento. Beneficio. Cierre y abandono.
Monitoreo y rescate arqueológico.	Mitigar el efecto causado por las obras de construcción y montaje de la mina La Ye sobre el patrimonio arqueológico del área de influencia inmediata del proyecto, y así aportar información al proceso de construcción de la historia de la zona.	Generación de expectativas. Afectación del patrimonio cultural.	Construcción y montaje. Arranque, transporte y almacenamiento.

9.4. Aspectos sociales

9.4.1. Dimensión social

El área de influencia directa del proyecto de explotación y beneficio de la mina La Ye está conformada por la vereda Naranjal (sectores La Tolva, que incluye a los caseríos La Lucha, y La Lápida), también por el sector Alto de María de la vereda Caño La Tres, así como por las veredas Cordero – Icacales y Cordero, territorios ubicados en la zona centroriental del Municipio de Zaragoza. (información extraída del documento PTO de la Mina La Ye).

Componente demográfico

El valle del río Nechí ubicado en la vertiente occidental de la Cordillera Central, fue una frontera natural y punto de encuentro entre las sabanas del Caribe Colombiano y la región Andina. Para Zaragoza y El Bagre el río Nechí en su desembocadura en el río Cauca y posteriormente en el Magdalena, aun representa la vía más expedita de comunicación con el resto del país.

Desde finales del siglo XIX, con la llegada de compañías extranjeras, comenzaron en la región dinámicas de poblamiento hasta el momento nunca esperadas. Esas compañías generaron cambios en la distribución de los espacios, en la apertura de nuevas tierras y vías de comunicación y en innovaciones tecnológicas que motivaron transformaciones en los poblados y veredas en los cuales se asentaba la que era conocida como sociedad zaragozana.

En términos generales, la población en la zona rural es baja, situación que contrasta con un índice muy elevado en las cabeceras, pues ésta puede presentar un número de habitantes similar al total de la del área rural.

En la **Tabla *9*** se encuentra la información de población de los municipios de El Bagre y Zaragoza de acuerdo con los censos realizados entre 1964 y 2018.

Tabla 9 Población de los municipios del área de influencia indirecta, Censos DANE.

El Bagre		**Zaragoza**	
Población histórica		**Población histórica**	
Año	**Pob.**	**Año**	**Pob.**
1964	6,922	1964	sin registro
1973	9,760	1973	sin registro
1985	20,658	1985	sin registro
1993	46,290	1993	21,231
2005	46,020	2005	26,939
2018	51,862	2015	30,738

Componente económico

En la zona del Bajo Cauca que comprende los municipios de Caucasia, Cáceres, Tarazá, El Bagre, Zaragoza, Valdivia y Nechí, la Unidad agrícola familiar UAF, según la potencialidad de explotación, está distribuida así: para uso agrícola entre 8 y 12 ha; para uso mixto (agricultura y ganadería) 48 a 65 ha y ganadería: 50 a 67 ha.

De acuerdo con el Anuario Estadístico de Antioquia de 2005, en la **Tabla *10*** se presenta la distribución de los predios en cada uno de los municipios del área de influencia.

Tabla 10. Distribución de predios en los municipios del área de influencia.

Municipio	< de 3 ha	3 a 10 ha	10 a 20 ha	20 a 50 ha	50 a 100 ha	> de 100 ha
Zaragoza	1186	104	168	467	371	296
El Bagre	791	134	177	418	327	216

En cuanto a la tenencia, en la subregión predominan las posesiones, resultado de un comportamiento histórico de apropiación de la tierra en períodos que coinciden con apogeos de explotación minera, en los cuales incluso sobre estas posesiones se han desarrollado invasiones aún con el consentimiento de los poseedores o propietarios.

El Bagre y Zaragoza tienen como principal actividad la minería del oro, así como los demás municipios que conforman la Subregión del Bajo Cauca. Con aportes del 48.68% y el 44% respectivamente de la producción total de oro del Departamento.

Zaragoza, al basar su desarrollo económico en la minería no ha consolidado sectores económicos y/o productivos alternativos, y se desarrollan actividades agrícolas, ganaderas, pecuarias, pesqueras, de explotación del bosque sin importantes volúmenes productivos, ni rendimientos significativos y con una comercialización en la que predominan los intermediarios.

En el Bagre, al igual que en Zaragoza, como complemento de la minería, se realiza una actividad agropecuaria, con predominio de la ganadería y en menor grado la agricultura con cultivos de arroz y sorgo. También se trabaja en la piscicultura en la producción de cachama, tilapia y especies nativas. (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2025)

Componente cultural

Para este componente es necesario aclarar que cuando se habla de Zaragoza, se hace referencia al territorio o valle geográfico e histórico del río Nechí en el Bajo Cauca Antioqueño y no a los actuales límites político - administrativos del Municipio.

La actividad minera aluvial implica un patrón de asentamiento disperso alrededor del río, sus afluentes y caños, con un elevado grado de dependencia de ese entorno. Por lo tanto, se hace referencia a una "comunidad dispersa", en donde el casco urbano solo es el lugar para la prestación de algunos servicios administrativos y comerciales. Allí la actividad principal, en este caso la minería, se desarrolla por fuera de la cabecera municipal. En otras palabras, al hablar de "sociedad zaragozana", se habla del grupo humano que vivió y vive a orillas del río Nechí y su zona de influencia en el Bajo Cauca Antioqueño, en la cual el territorio del hoy Municipio de El Bagre juega un papel primordial (información extraída del documento Plan de Trabajo y Obras de la Mina La Ye).

En aquella sociedad se conjugaron elementos sociales y culturales del "ser ribereño" y del "ser minero". Esa doble condición determina un "ser zaragozano" diferente al simplemente minero

o ribereño. Es decir, oro y río son igualmente significativos en la construcción de la identidad local.

Desde la época colonial las relaciones comerciales de la región se realizaron a través de los ríos Nechí, Cauca y Magdalena y cuando en Zaragoza se instaló la Pato Gold Mines, esa malla fluvial fue la ruta por donde llegaron los migrantes a la localidad. Inmigraban no sólo de los pueblos de las sabanas del Caribe Colombiano: Corozal, Sincé, Sahagún, Planeta Rica, Ayapel, Achí, Majagual y Magangué, sino también de Antioquia: Caucasia, Cáceres, Anorí, Yarumal, Amalfí, Angostura, Remedios y Segovia.

La gran mayoría de los habitantes del valle del río Nechí hacen parte de lo que el investigador Fals Borda ha denominado en sus estudios como "cultura anfibia", definiéndola como aquella cultura "producida por los versátiles habitantes de laderas, caseríos, caños, playones y bosques de la depresión momposina; aquellos que combinan estacionalmente la explotación agrícola, pecuaria y selvática con la fluvial y pesquera en el mismo hábitat o territorio (información extraída del documento PTO de la Mina La Ye).

Componente político

La Subregión del Bajo Cauca aún se caracteriza por ser un territorio de frontera, lo cual le permite una interacción cultural con otras regiones de Antioquia y de los departamentos vecinos. Se identifica igualmente por tener una movilidad social permanente de diversos grupos culturales y étnicos y por su economía extractiva, lo que repercute en sus patrones de asentamiento, estrategias adaptativas, diversidad cultural, cambios en el paisaje y deterioro de los recursos naturales. La constante lucha por la apropiación de éstos ha generado conflictos por las migraciones internas y externas a la región, situación que también incide en la sostenibilidad del proceso organizativo de las comunidades y en la gobernabilidad en general de los municipios de Zaragoza y El Bagre.

La débil capacidad de los gobiernos municipales para gestionar el desarrollo local, la inexistencia de liderazgos y la falta de un proyecto de desarrollo común, concertado, que agrupe y defina interacciones entre los distintos responsables de la gestión para el desarrollo (ciudadanía y gobierno), la poca transparencia en el manejo de los recursos públicos, el despilfarro, son una síntesis de los mayores problemas que impiden de manera notable, la eficiencia y eficacia de la gestión pública. La corrupción, el manejo clientelista de los procesos administrativos, las prioridades desacertadas en el manejo y aplicación de los recursos públicos, de por si insuficientes, actúan negativamente en la confianza y credibilidad de los ciudadanos frente a las autoridades que los representan y por supuesto, son causa del atraso y bajo desarrollo social de los dos municipios del área de influencia indirecta del proyecto.

A esta situación se suma la debilidad de la participación ciudadana para inducir y promover procesos de desarrollo. Se evidencia la carencia de organizaciones sociales con respaldo comunitario que lleven a cabo su papel de controlar la gestión pública y, particularmente, el control del gasto público. También se observa la carencia de líderes sociales y políticos que encabecen la movilización social, para buscar oportunidades de mejoramiento de la calidad de vida y bienestar de toda la comunidad. *(Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2024).*

9.5. Impacto social de proyecto minero La Ye

El desarrollo del proyecto La Ye desde las etapas de prospección, exploración y explotación ha sido una fuente de empleo formal para las comunidades que habitan en la zona de influencia y que por años han basado sus fuentes de ingresos en actividades informales como la minería artesanal y las actividades agrícolas.

Se estima que el proyecto La Ye en sus diferentes áreas (exploración, explotación, beneficio, servicios generales, administrativos y servicios técnicos) generó empleo formal para400 a 600 personas al año de manera directa y para 500 y 1000 de manera indirecta, es decir, en servicios de suministros, combustibles, alimentación, transporte, etc.

La mayor empleabilidad de la zona mejoró las condiciones de acceso a servicios básicos de salud y bienestar para este grupo humano. Adicionalmente a la la oferta de trabajo formal generada, la empresa Operadora Minera S.A.S. en sus políticas de inversión social y responsabilidad empresarial creó programas que redundaron en mejorar las condiciones de vida tanto de los empleados como de las comunidades aledañas. Entre estos programas se destacan los siguientes:

- Contratación prioritaria de servicios y mano de obra con las comunidades locales.
- Subsidios que incentiven la formación educativa, tanto de las comunidades como de los empleados y sus familias.
- Fortalecimiento de los programas agrícolas de la región.
- Mejoras en la infraestructura de las comunidades de la zona de influencia.
- Acompañamiento en los procesos de formalización de mineros ancestrales y artesanales de la zona de influencia.

En resumen, se destaca como impacto social positivo el desarrollo del proyecto minero de La Ye que ha contribuido con mejorar e impulsar las condiciones de vida de las comunidades de su zona de influencia, además de impulsar y promover la vocación agrícola de la región. (información extraída del documento PTO de la Mina La Ye).

10. PLAN DE CIERRE DE LA EXPLOTACIÓN Y ABANDONO DE LOS MONTAJES Y DE LA INFRAESTRUCTURA

Una vez agotadas las reservas económicamente explotables del mineral del proyecto La Ye o el de cualquier otro proyecto, se debe proceder a desarrollar un plan de cierre y abandono de la mina, esto es con el fin de devolver o reintegrar la zona al paisaje inicial, con esto se busca minimizar los efectos adversos dejados por las actividades mineras que se realizaron, para ejecutar dicho cierre se debe seguir un cronograma y presupuesto proyectado previamente evaluado y aprobado por la autoridad y los auditores mineros con competencia en el tema.

El Código de Minas en su Artículo 105, se refiere a las Instalaciones comunes, en el beneficio y acopio de los minerales y, si fuere del caso, en su transformación, así como para el ejercicio de

las servidumbres, indicando que, " los concesionarios podrán utilizar obras, instalaciones y plantas de uso común para varias explotaciones de un mismo o de varios beneficiarios de títulos mineros, cuyas áreas sean contiguas o vecinas"

Distintos estudios realizados por la Operadora Minera S.A.S. y asesores internacionales indicaron en el distrito minero de Segovia-Remedios y zonas circunvecinas, la existencia de un yacimiento vetiforme de oro tipo orogénico, es decir a un depósito emplazado a profundidad, estructuralmente controlado, lo cual indica continuidad a grandes profundidades.

Luego, independientemente de la centralización de las actividades de beneficio de mineral de toda el área 6862 y de otras áreas de la zona, contratadas con la Gobernación de Antioquia en la planta que se encuentra en el proyecto minero La Ye, existen otros aspectos del plan de cierre de mina que deben y pueden avanzar. .

10.1. Plan de obras de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal del sistema alterado

El Plan de Manejo Ambiental de la mina La Ye, cuenta con la licencia ambiental otorgada mediante Resolución 130PZ-1461 de 2008 y la modificación de esta bajo la Resolución 130PZ-1629 de 2009

El manejo del plan de obras de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal del sistema alterado, está de acuerdo a las medidas establecidas en la fichas de manejo PMF 08 (Control de la erosión y sedimentos), PMB 01 (Cercamiento de zonas protectoras y enriquecimiento de especies) y PMB 02 (Establecimiento de bosque protector productor),

En el Anexo B se detallan las actividades relacionadas con la recuperación paisajística y geomorfológica del cierre de la mina La Ye, debido a que actualmente este complejo industrial procesa mineral de diferentes proyectos por lo que un plan de cierre del complejo aún está en evaluación.

De manera breve y relacionadas con el proceso de desmonte y cierre de la mina La Ye se describen a continuación las principales actividades:

- Cierre de la bocamina y los inclinados de mineral: para esta labor y después de finalizadas las tareas de soporte final de los bloques de explotación y de extracción de los equipos y herramientas, se procederá a derrumbar controladamente los tuneles que tengan acceso a superficie. En las labores que por motivos de estabilidad no puedan ser derrumbadas, se generarán muros de concreto que sellen permanentemente las mismas, evitando el ingreso de personas o animales posterior al desmonte del proyecto.
- En general como las labores fueron soportadas y rellenadas cuando se extrajo el mineral, se realizará monitoreo de la subsidencia en superficie en las inmediaciones de la mina con el objetivo de informar y tomar medidas si se presentan anomalías en las mediciones.
- Recuperación paisajística y geomorfológica; y restablecimiento de las características del

suelo (ver anexo B): se realizarán plantaciones de especies nativas, se efectuará recuperación de las características del suelo en los lugares donde la operación tuvo incidencia y generó impactos en el entorno.

11. CONCLUSIONES

- El depósito metálico de La Ye es un depósito vetiforme de Au-Ag de edad pérmica encajado en una zona de cizalla que se encuentra hospedado en rocas plutónicas carboníferas.
- La veta La Ye ha sido explotada por la empresa Operadora Minera S.A.S. desde el año 2010 hasta la actualidad, y al día de hoy se encuentra en etapa de cierre. Durante los años de operación, esta mina subterránea desarrolló siete niveles de explotación (Guías) con una extensión en el sentido del rumbo de 2.2 km y en el sentido del buzamiento de 300 m aproximadamente, con un espesor promedio de veta de 1.15 m.
- La veta la Ye está compuesta principalmente por cuarzo bandeado (70 – 90%), carbonatos (hasta 10%), sericita (5%), pirita como principal sulfuro (1 – 10%), galena (hasta el 5%), calcopirita, molibdenita y telururos de Au-Ag (hasta 1%).
- En la Mina La Ye, el oro se presenta de forma libre, asociado al cuarzo y la pirita, lo que indica un evento mineralizante temprano. En un segundo evento mineralizante, en el que el oro alcanza las concentraciones más significativas, se encuentra asociado a sulfuros y telururos, rellenando fracturas, al igual que en la pirita. En el depósito vetiforme de La Ye, el oro se identificó en dos formas: como oro nativo y como electrum.
- Las asociaciones minerales y texturales observadas permiten definir una secuencia paragenética en donde se evidencian al menos dos eventos de mineralización (Fig. 15). El primero está constituido por volúmenes significativos de cuarzo, con poco sulfuro (pirita) y cantidades menores de Au. El segundo evento mineralizante está conformado por cantidades escasas de cuarzo, con presencia de sulfuros como: galena, pirita y calcopirita, además de telururos de Ag-Au y Pb como silvanita, hessita y altaita.
- Se estima que de la mina La Ye se extrajeron entre 180.000 y 220.000 onzas de oro en toda la vida útil del proyecto.
- Se estima que el proyecto La Ye en sus diferentes áreas (exploración, explotación, beneficio, servicios generales, administrativos y servicios técnicos) generó empleo formal para 400 a 600 personas al año de manera directa y para 500 a 1000 de manera indirecta, es decir, en servicios de suministros, combustibles, alimentación, transporte, etc.
- Las tareas de cierre de mina proyectado pretenden realizar una recuperación integral del entorno en el cual se desarrolló el proyecto La Ye, es decir un bloqueo a los socavones para evitar incidentes con la comunidad, actividades de recuperación paisajística y monitoreos de subsidencia en las zonas de influencia de la mina.

BIBLIOGRAFÍA

Arias López, A. (1995). El relieve de la zona central de Antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia, 10, 9–24. https://doi.org/10.17533/udea.redin.325539.

Castro-Lotero, (2015). Caracterización metalográfica, petrográfica y ocurrencia de oro de las mineralizaciones vetiformes presentes en mina La Ye y mina Los Mangos, distrito minero Bagre- Zaragoza, Antioquia, [Tesis pregrado]: Universidad de Caldas.

González, H. (2001). Mapa geológico de Antioquia Escala 1:400.000: Memoria explicativa. Ingeominas. Bogotá.

González, H y Londoño, A. (2002). Catálogo de Unidades Litoestratigráficas – Batolito de Segovia: Ingeominas.

Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach, [Tesis Doctoral]: Universitat de Barcelona.

Londoño, C., Montoya, J.C., Ordoñez, O., & Restrepo, J.J. (2009). Características de las mineralizaciones vetiformes en el Distrito Minero Bagre-Nechí, Antioquia: Boletín de Ciencias de la Tierra, 26, 29-38.

Montoya–Garcia, J.; Ordoñez–Carmona, O. (2010). Cartografía Geológica y Caracterización petrográfica de las unidades litológicas asociadas a los cuerpos vetiformes de oro en el Distrito Minero Bagre- Nechí. Informe técnico.

Naranjo-Sierra., Alvaran-Echeverry., Zapata-Cardona. (2016). Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en la mina La Ye, Antioquia, Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales: Revista Mexicana de Ciencias geológicas, 33, (3), 316-328.

Naranjo-Sierra, E. (2019). Estudio metalogénico de los depósitos vetiformes La Ye, Los Mangos y el prospecto Cordero-Balvina en la zona norte del Distrito Minero El Bagre, Antioquia-Colombia. Tesis de Maestría, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

Naranjo-Sierra, E.; Alvaran-Echeverri, M. (2020). Fluid inclusion study of shear zone hosted lode gold type deposits: El Bagre mining district, Antioquia-Colombia: Earth Sciences Research Journal, 24, (3), 245-257. https://doi.org/10.15446/esrj.v24n3.80653.

Naranjo Sierra, E. (2021). Ore-controlling structures and geostatistical determination of ore-shoots in shear zone hosted lode gold type deposits, El Bagre, Antioquia, Colombia: Earth Sciences Research Journal, 26, (1), 46-53. https://doi.org/10.15446/esrj.v26n1.92419.

Owona, S., Ondoa, J.M., Ekodeck, E. (2013). Evidence of Quartz, Feldspar and Amphibole Crystal Plastic Deformations in the Paleoproterozoic Nyong Complex Shear Zones under Amphibolite to Granulite Conditions (West Central African Fold Belt, SW Cameroon): Journal of Geography and Geology, 5 (3), 186-201.

Salgado-González, D.; Muñoz-Ospina, J.D.; Naranjo-Sierra, E.; Cardona-Ríos, J.J. (2021). Características estructurales de los depósitos vetiformes La Ye y Mangos, Distrito Minero El Bagre (Antioquia, Colombia): Boletín de Geología, 43, (3), 125-141. https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021006.

Shaw, R.P. (2000). Gold mineralization in the Northern Andes – magmatic setting vs. metallogeny, en XI International Mining Congress: Bogotá, Colombia, technical abstracts p. 19.

Sillitoe, R.H. (2008). Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera – Distribution, tectonomagmatic settings and metallogenic considerations: Economic Geology, 103, 663-687.

Starling, A. (2014). Structural review of La Ye mine and District. Internal Field Report prepared for Mineros S. A. and Operadora Minera S.A.S., 26 pp.

Stipp, M., Kunze, K. (2002). Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates: Tectonophysics, 448 (1-4), 77-97.

Varona-Bravo, D. (2016). Caracterización petrográfica y geoquímica del sector norte del stock El Carmen. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.

Zapata-Cardona, E., Hernández-González, J. S., Quiceno-Colorado, J. A., Ruiz-Jiménez, E. C., Moreno-Sánchez, M., Naranjo-Sierra, E., & Rincón-Alape, J. (2023). Petrogenesis and tectonic implications of the carboniferous El Carmen Pluton, central Colombian Andes: insights from whole-rock and mineral geochemistry, in situ zircon Lu–Hf isotopes and U–Pb geochronology: International Geology Review, 1-26. DOI: 10.1080/00206814.2023.2286481.

Dong,G., Morrison, G., & Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland—classification, origin, and implication. Economic Geology, 90(6), 1841–1856.

Operadora Minera S.A.S. (2010). Plan de Trabajos y Obras para el proyecto Mina La Ye (PTO). Operadora Minera S.A.S.

Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. (1989). Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. V Congreso Colombiano de Geología. Memoirs, p. 127–146. Bucaramanga.

Feininger, T., Barrero, D., y Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (subzona II-B). Boletín Geológico, 20(2), 1-160.

Acción Latina. (2023). Razones por las cuales el oro es considerado un activo refugio. Acción Latina.

OroyFinanzas. (2009, enero 1). La crisis del 2008 saca a relucir el brillo del oro.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2025). Informe sobre la economía minera en el Bajo Cauca y la tenencia de tierras.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2024). Informe sobre la gobernabilidad y desarrollo del Bajo Cauca.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). Exportaciones de Colombia. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/exportaciones.

ANEXOS

A. Datos estructurales de la Mina la Ye.

Veta

AZIMUT	DiP-DIRECTION	INCLINACIÓN	CUADRANTE
340	250	55	SW
335	245	65	SW
340	250	50	SW
340	250	55	SW
340	250	62	SW
343	253	65	SW
340	250	65	SW
340	250	60	SW
350	260	60	SW
346	256	60	SW
328	238	60	SW
340	250	55	SW
344	254	50	SW
340	250	65	SW
295	205	60	SW
330	240	70	SW
336	246	60	SW
329	239	59	SW
300	210	61	SW
356	266	51	SW
348	258	43	SW

AZIMUT	DiP-DIRECTION	INCLINACIÓN	CUADRANTE
346	256	43	SW
357	267	78	SW
11	101	69	SE
349	259	80	SW
341	251	46	SW
352	262	55	SW
341	251	50	SW
339	249	51	SW
15	285	70	NW
15	285	46	NW
15	285	52	NW
340	250	55	SW
340	250	45	
337	247	50	SW
322	232	50	SW
329	239	50	SW
332	242	50	SW
348	258	40	SW
341	251	45	SW
338	248	37	SW
324	234	35	SW
336	246	40	SW
342	252	40	SW
329	239	25	SW
335	245	65	SW
325	235	55	SW
310	220	54	SW
280	190	85	SW
340	250	50	SW
350	260	65	SW
355	265	75	SW
355	265	76	SW
350	260	80	SW
350	260	80	SW
345	255	85	SW
358	268	80	NE
350	260	85	NE
355	265	63	SW
340	250	70	SW
340	250	90	
345	255	80	SW
350	260	60	SW
345	255	83	SW
330	240	75	SW
320	230	85	NE
320	230	85	NE
333	243	85	NE
342	252	85	NE
354	264	85	NE
330	240	80	SW
340	250	80	SW
14	284	85	NW
2	272	85	NW
2	272	85	W
358	268	88	NW
359	269	85	W
335	245	80	SW
330	240	70	SW

AZIMUT	DiP-DIRECTION	INCLINACIÓN	CUADRANTE
340	250	75	SW
305	215	85	NE
275	185	85	NE
335	245	60	SW
335	245	70	SW
345	255	70	SW
345	255	70	SW
130	40	40	SW
130	40	36	SW
130	40	30	SW
130	40	30	SW
210	120	60	NW
10	280	50	NW
10	280	65	NW

Fallas Mayores.

AZIMUT	DIP DIRECTION	INCLINACIÓN	CUADRANTE
235	325	45	NW
277	7	55	NE
191	281	48	NW
330	60	63	NE
30	300	45	NW
297	27	61	NE
293	23	45	NE
315	45	45	NE
278	8	45	NE
290	20	40	NE
205	295	40	NW
342	342	90	
286	16	50	NE
290	20	50	NE

Fallas Menores

AZIMUT	DIP DIRECTION	INCLINACIÓN	CUADRANTE
270	270	55	N
280	10	65	NE
280	10	90	NE
285	15	60	NE
200	290	32	NW
265	355	60	NW
285	15	66	NE
270	270	60	N
10	280	72	NW
355	265	58	SW
280	10	60	NE
280	10	60	NE
295	25	60	NE
280	10	80	NE
260	350	64	NW
315	225	45	SW
330	240	60	SW
10	280	60	NW
25	295	40	NW

AZIMUT	DIP DIRECTION	INCLINACIÓN	CUADRANTE
315	45	66	NE
55	325	51	NW
345	255	48	SW
10	280	50	NW
10	280	48	NW
130	40	68	NE
200	290	70	NW
78	348	72	NW
45	315	54	NW
57	327	65	NW
304	34	68	NE
312	42	71	NE
296	26	78	NE
306	36	80	NE
300	30	69	NE
306	36	52	NE
135	225	45	NW
282	12	48	NE
346	76	90	NE
85	355	81	NW
281	11	50	NE
60	330	50	NW
286	16	50	NE
276	6	42	NE
328	58	80	NE
298	28	55	NE
75	345	85	NW
270	0	80	N
260	260	90	
270	0	70	N
50	320	62	NW

B: Actividades de recuperación paisajística y geomorfológica relacionadas con el cierre de la Mina La Ye.

NOMBRE DEL PROGRAMA:
Cercamiento de zonas protectoras y enriquecimiento de especies

Código:
PMB 01

TIPO DE MEDIDA:
Mitigación y compensación

MOMENTO DE EJECUCIÓN:
Cierre y abandono

IMPACTOS AMBIENTALES:

- Pérdida de cobertura vegetal
- Afectación de comunidades faunísticas

NORMATIVIDAD APLICABLE:
Ley 1021 de 2006. Ley General Forestal

COBERTURA ESPACIAL:
Áreas aledañas a los bloques.

JUSTIFICACIÓN:
En la etapa de construcción se requiere remover cobertura vegetal en las áreas correspondientes a la planta de tratamiento y beneficio y en la que se ubicarán las oficinas.

Estas coberturas se encuentran en una etapa temprana de sucesión secundaria, desarrollada sobre áreas afectadas por la minería tradicional de la zona.

El cerramiento de áreas que no serán afectadas por el proyecto y que actualmente se encuentran degradadas por la actividad minera tradicional, favorecerá el avance de la sucesión y la conformación de parches y corredores que ofrezcan recursos para la fauna, compensando la afectación que se genera en las áreas requeridas por el proyecto.

OBJETIVO(S):

- Favorecer el desarrollo de la regeneración natural.
- Realizar enriquecimiento de especies en las zonas cercadas para mejorar oferta de hábitat a la fauna de la zona.
- Ampliar el área de parches boscosos (bosque y rastrojo alto) y favorecer su conectividad.

META(S):

- **Elaboración de mapa actualizado de coberturas vegetales:** Generar un mapa de cobertura vegetal actualizado.
- **Análisis de conectividad:** Ubicar y delimitar en cartografía las áreas identificadas para cerramiento.
- **Delimitación y cerramiento de toda la zona identificada como de protección:** Evaluar la relación entre el área cerrada y el total del área identificada y delimitada para cerramiento.
- **Establecer módulos de vegetación en todas las áreas identificadas para enriquecimiento de especies:** Evaluar el área enriquecida respecto al total de área identificada para el establecimiento de módulos de vegetación.
- **Realizar estudios de sucesión vegetal:** Evaluar la cantidad de estudios realizados en relación con los estudios programados para el período evaluado.

ACCIONES DE MANEJO:

1. **Revisión del estado actual de la cobertura vegetal:** Se realizará mediante fotografías aéreas recientes para determinar la existencia de fragmentos de bosque y rastrojo que puedan ser conectados entre sí por corredores biológicos o en los que se pueda ampliar la cobertura boscosa. Esto permitirá el desplazamiento de fauna y la restauración de los ecosistemas alterados.
    - **Tiempo de ejecución:** Primer año de construcción.

- **Periodicidad de la verificación:** Anual.
- **Responsable:** División de Medio Ambiente.

2. **Delimitación y cerramiento de la zona identificada:** Se procederá a cerrar las áreas identificadas como zonas de protección.
    - **Tiempo de ejecución:** Primer año de construcción.
    - **Periodicidad de la verificación:** Anual.
    - **Responsable:** División de Medio Ambiente.
3. **Establecimiento de módulos de vegetación:** En los sitios donde se identifique que pueden ampliarse parches boscosos o conectarse estos, se verificarán las áreas más abiertas para establecer módulos de vegetación con especies propias de la zona.
    - **Tiempo de ejecución:** Primer año de construcción.
    - **Periodicidad de la verificación:** Anual.
    - **Responsable:** División de Medio Ambiente.
4. **Evaluación del desarrollo de la sucesión:** Se realizarán estudios para establecer la composición y estructura de las coberturas evaluadas.
    - **Tiempo de ejecución:** Segundo año de la construcción y posteriormente cada cinco años.
    - **Periodicidad de la verificación:** Cada cinco años.
    - **Responsable:** División de Medio Ambiente.

NOMBRE DEL PROGRAMA:
Establecimiento de bosque protector - productor

Código:
PMB 02

TIPO DE MEDIDA:
Prevención, control, mitigación y compensación

MOMENTO DE EJECUCIÓN:
Montaje y extracción.
Cierre de Mina

IMPACTOS AMBIENTALES:

- Pérdida de cobertura vegetal
- Afectación de comunidades faunísticas

NORMATIVIDAD APLICABLE:
Ley 1021 de 2006. Ley General Forestal

COBERTURA ESPACIAL:
Áreas aledañas a los bloques.

JUSTIFICACIÓN:

La zona en que se ubica el proyecto ha sido afectada por la actividad minera tradicional y por la extracción de maderas con valor comercial, por lo tanto, la oferta de este recurso en el área de influencia directa es escasa.

La mina requiere de madera para el proceso de entibado. La demanda que se genera conlleva a la presión del recurso bosque en zonas por fuera del área de influencia directa que todavía conservan relictos boscosos importantes por sus funciones ecológicas, su diversidad y la oferta de servicios, especialmente los relacionados con la regulación de agua.

El establecimiento de un bosque protector-productor que cumpla las funciones de una plantación para proveer de madera a la mina permitirá que la presión sobre bosques naturales se reduzca, favorecerá el incremento de áreas boscosas en los sitios degradados por la minería tradicional, conformará conectividad para los naturales y será sitio eventual de refugio y otros recursos para la fauna.

Socialmente tendrá valor por la generación de empleos adicionales a los que demande la labor de minería, por el mejoramiento de la calidad visual del paisaje y por la recuperación de tierras degradadas.

OBJETIVO(S):

- Establecer un bosque protector-productor para el abastecimiento de madera a largo plazo del proyecto.
- Ampliar y favorecer la conectividad de parches boscosos.

META(S):

- Definir áreas para el establecimiento del bosque protector-productor: Generar un mapa con la ubicación de las futuras plantaciones (lotes).
- Planificación de todos los lotes a plantar: Medir el número de lotes con planificación en relación con el número de lotes proyectados.
- Seguimiento al crecimiento y desarrollo en todos los lotes: Registrar los lotes con información de crecimiento y desarrollo en relación con el número total de lotes plantados.
- Registro de volúmenes de madera aprovechados: Identificar los lotes con registros de volúmenes aprovechados en relación con el número total de lotes aprovechados.

DESCRIPCIÓN DE ACCIONES DE MANEJO:

1. **Definición de áreas a plantar:** Se realizará previo a la construcción del proyecto, en el semestre anterior a la construcción. Verificación anual a cargo de la División de Medio Ambiente.
2. **Planificación de lotes:** Se definirán las especies y el cronograma, incluyendo actividades de establecimiento, poda, entresaca y aprovechamiento final. Se ejecutará

en el semestre anterior a la construcción con verificación anual a cargo de la División de Medio Ambiente.

3. **Establecimiento de lotes:** Una vez definidas las especies y planificadas las actividades, se iniciará el establecimiento de los lotes. Las áreas anuales de siembra se definirán durante la planificación, considerando los turnos de aprovechamiento de acuerdo a la demanda de madera de la mina y el crecimiento de las especies. Se ejecutará según lo determinado en la planificación con verificación anual a cargo de la División de Medio Ambiente.

4. **Mantenimiento de las plantaciones:** En todos los lotes establecidos se hará mantenimiento de las plantaciones. Se establecerán los requerimientos de fertilización según las especies y su tolerancia a las condiciones de acidez del suelo, así como las podas y entresacas programadas. Se ejecutará de manera permanente con verificación semestral a cargo de la División de Medio Ambiente.

5. **Aprovechamiento de madera:** Se realizará de acuerdo con el desarrollo de los individuos plantados y los requerimientos técnicos de la mina para el entibado. Se ejecutará de manera permanente con verificación semestral a cargo de la División de Medio Ambiente.