

Análisis macroscópico y petrográfico

1. Generalidades

El inclinado de acceso a la mina tiene orientación general sureste (Figura 1a), inclinación de 55° y longitud de 120 m. Los recorridos por las diferentes labores se llevaron a cabo según la profundidad. Inicialmente, se visitaron las labores con direcciones oeste y sureste, las cuales se encuentran a 70 m de profundidad. No fue posible obtener información geológica sobre la guía sureste, puesto que se encuentra recubierta con sostenimiento tipo puerta alemana y en su mayoría estaba inundada (Figura 1b y 1c). La guía con dirección noroeste se ubica a 90 m de profundidad, en su totalidad tiene sostenimiento natural y de esta se pudo obtener la mayor cantidad de información, incluyendo el número de muestras; adicionalmente, cuando se desarrolló la fase de campo, allí se adelantaban los trabajos exploratorios del frente de mina.

Figura 1.

Inclinado de acceso y guía con dirección sureste



Nota: (a) Inclinado de acceso a la mina, el cual contiene el enriado del coche (izquierda) y las escaleras con plataforma (derecha) para el ingreso del personal. Guía inactiva con direcciones en azimut de rumbo sureste 102° (b) y 131° (c). Esta cuenta con sostenimiento artificial en toda su extensión. Los últimos 60 m tienen inclinación de 25° y cuando se visitó la mina estaban inundados (c).

2. Análisis macroscópico

Durante las jornadas de campo, se analizó macroscópicamente la mineralogía y alteraciones hidrotermales de las rocas aflorantes. Lo anterior, estuvo acompañado del respectivo registro fotográfico y toma de datos estructurales, relacionados con las orientaciones de cuerpos vetiformes, planos y estrías de falla.

a. Roca encajante

El saprolito es formado por la acción del ambiente húmedo tropical, que favorece procesos de meteorización química como el pseudomorfismo y la lixiviación. Se observan coloraciones rojizas, amarillentas, rosadas y blancuzcas relacionadas con la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y arcillas. Además, se encuentran cristales subredondeados de cuarzo con tamaños variables hasta los 2 mm.

Al interior de la mina se pudieron identificar con mayor detalle las características de la roca encajante, ya que allí el grado de meteorización es menor. La roca presenta aspecto moteado constituido por colores gris claro, negro, salmón y en ocasiones verde claro debido a la alteración. Es fanerítica, holocristalina, leucocrática, tiene tamaño de cristales medio a fino y su textura es hipidiomórfica equigranular. Mineralógicamente está compuesta por plagioclasa, cuarzo, biotita, feldespato potásico y, en menor medida, anfíbol y magnetita. La roca se encuentra afectada por alteración hidrotermal selectiva clorítica y sericítica, que produce zonas de pirita (\pm calcopirita) diseminada. También se presentan halos milimétricos de alteración sericita alrededor de venillas que cortan la roca.

b. Dique monzogranítico

Este cuerpo es fanerítico, holocristalino, con cristales de tamaño muy fino, alotriomórfico equigranular y leucocrático. Mineralógicamente predominan la plagioclasa (30%-35%), cuarzo (25%-30%), feldespato potásico (20%-25%) y en menor medida se encuentra biotita (10%-15%). Según el diagrama de clasificación modal de Streckeisen para rocas plutónicas, el dique es de composición monzogranítica. La alteración sericítica y clorítica presente de forma pervasiva en la guía, afecta las plagioclasas y biotitas, respectivamente. Debido a lo anterior, se producen coloraciones verdes y beige. El contacto con la roca caja es neto y se evidencia un alto grado de oxidación en esta.

c. Estructuras hidrotermales

En los alrededores e interior de mina Guitarra se hallaron manifestaciones de actividad hidrotermal, conformadas por estructuras con alteraciones asociadas. Se evidencian variaciones en el espesor, orientación, localización, textura, mineralogía y alteraciones hidrotermales. Según el espesor, las estructuras se denominaron como venillas (<1 cm), venas (1-10 cm) y vetas (>10 cm). En superficie las estructuras hidrotermales están predominadas por *alteraciones supérgenas*, correspondientes a oxidación y argilización que producen coloraciones rojizas, amarillentas, marrones y blancuzcas. Sin embargo, en el interior de la mina estas alteraciones tienen una intensidad elevada en las zonas de fallas, ya que favorecen una mayor infiltración de aguas meteóricas. Por ejemplo, alrededor de las piritas se producen halos rojizos y amarillentos por la facilidad con que se oxida dicho mineral. El proceso de alteración supérgena alcanza estadios avanzados, hasta el punto de lixiviar por completo los minerales y formar oquedades con cuarzo subredondeado como remanente. Indicando el trazo de las estructuras, se hallan “riegos” de minerales que por sus propiedades fisicoquímicas son más resistentes a la alteración.

- Estructuras de magnetita

La magnetita tiene color plateado, brillo metálico, hábito masivo en agregados y tamaño promedio de 1 mm. La pirita se encuentra en cubos y piritoedros variando de subhedral a euhedral y con tamaños de 1 mm. En menor proporción se observan cristales de calcopirita, los cuales son masivos, amarillo latón y tienen tamaños de 1 mm. Además, hay óxidos de Cu producto de enriquecimiento supérgeno, algunos son verdosos y reacción al HCl, por lo que se infiere que corresponden a malaquita. El mineral que compone los halos de alteración está en agregados granulares, tiene brillo vitreo y dureza superior a 5 en la escala de Mohs, de modo que preliminarmente se identificó como feldespatos potásico.

- Estructuras de especularita

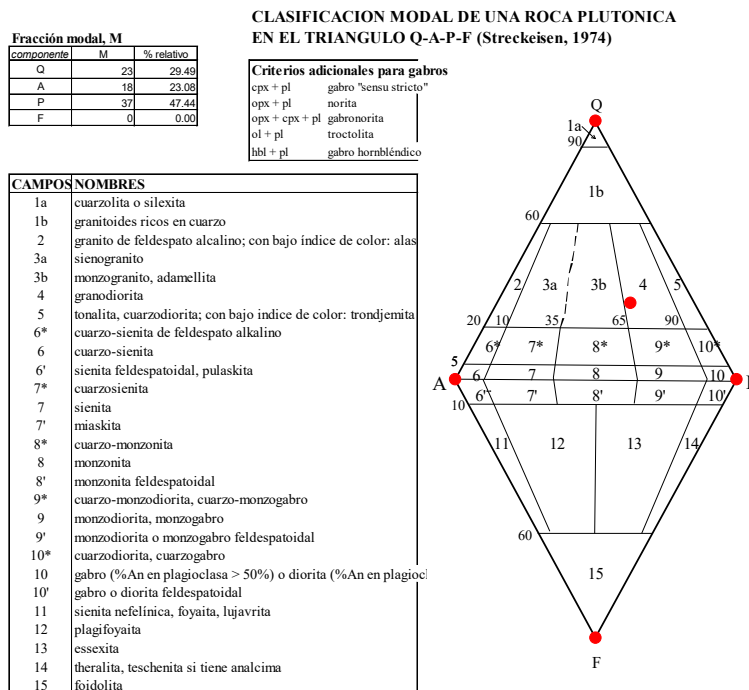
La especularita tiene color plateado, brillo especular característico, hábito laminar en agregados y tamaño promedio 1-2 mm, pero puede alcanzar los 5 mm. La pirita se encuentra en cubos y piritoedros variando de subhedral a euhedral, con tamaños promedio de 2 mm. En menor proporción se observan cristales de calcopirita, los cuales son masivos, amarillo latón y tienen tamaños de 1-2 mm. Algunos cristales de calcopirita exhiben iridiscencias por lo que se pueden confundir con bornita, sin embargo, al aplicar HCl son removidas las pátinas de óxidos de cobre y queda expuesta la superficie del metal con su color amarillo latón característico. Este efecto se debe a la inestabilidad iónica del cobre bajo la presencia de un medio ácido, lo cual diluye complejos de cobre (Cu^+ y Cu^{2+}) con agua y iones de cloro (Cl^-) (Heredia, 2011).

3. Análisis petrográfico

a. Roca encajante

Figura 1.

Clasificación de la roca encajante



Nota: Según la composición mineralógica (cuadro superior izquierdo), la roca encajante recibe la denominación de Granodiorita. Modificado de Streckeisen, 1974.

A continuación, se especifican las características para cada mineral que compone la roca caja:

- La **plagioclasa** se encuentra con habito tabular subhedral, tamaños entre 0.6 mm y 2.2 mm, y exfoliación regular en una dirección y en algunos casos dos direcciones a 90°. Tiene maclamiento característico de tipo polisintético (albita), periclina y albita-carlsbad. No se pudo determinar ópticamente la composición mediante el método de Michel-Lévy, ya que los cristales tienen ligera extinción ondulante, zonación y alteración. Las zonas de borde con el cuarzo y feldespato potásico son de carácter sinuoso. La zonación en algunos cristales es visible por medio de la extinción. Asimismo, la variación composicional de los bordes con

mayor contenido de sodio e interiores más cálcicos, se evidencia con la presencia de sericita y epidota-clinozoisita, respectivamente. Los márgenes sódicos no parecen estar relacionados con alteración hidrotermal sino con procesos tardimagmáticos de enfriamiento.

- El **cuarzo** tiene forma anhedral, extinción ondulante y tamaños entre 0.4 mm y 2.8 mm. Presenta textura masiva e intersticial con terminaciones en ángulo agudo. Puntualmente, con el feldespato potásico puede desarrollar textura micrográfica incipiente en forma de intercrecimientos, los cuales presentan continuidad cristalográfica con el cristal de cuarzo adyacente.
- El **feldespato potásico** tiene formas anhedrales, leve extinción ondulante y tamaños entre 0.7 mm y 2.4 mm. Presenta textura de intercrecimiento peritética en forma de llamas y textura intersticial con terminaciones en ángulo agudo. Desarrolla textura poiquilítica con inclusiones de plagioclasa y, en menor proporción, cuarzo, hornblenda y biotita. Es común encontrarlo asociado con plagioclasa a través de embañamientos, bordes cóncavos, redondeados y corroídos, hasta el punto de englobar algunos cristales. Esto no parece estar relacionado con procesos metasomáticos, sino con el orden de cristalización magmática plasmado en la serie de reacción de Bowen.
- La **biotita** tiene hábito subhedral tabular y anhedral con cristales de baja integridad, terminaciones irregulares y a veces intersticiales. Los tamaños son de 0.4-1.6 mm, el pleocroísmo es intenso con tonos marrones a rojizos. Sus coloraciones varían según las concentraciones catiónicas de Fe y Ti, puesto que tonos amarillos a verde azulado, marrones y marrones rojizos indican contenidos bajos de Ti, altos de Fe y altos de Ti, respectivamente (Petroigne, 2022). La

extinción es paralela en “ojo de pájaro” y los colores de interferencia pertenecen al segundo orden, aunque están enmascarados por el fuerte color del mineral. Algunos cristales tienen microplegamientos con ejes perpendiculares a la dirección del clivaje. A lo largo de toda la sección se observa pseudomorfismo parcial o total, por medio de los planos de exfoliación, a clorita que normalmente exhibe colores de interferencia anómalos azules y violetas, los cuales indican alto contenido de hierro. Como subproductos de esta alteración se encuentran asociados óxidos de hierro, titanita, epidota y esporádicamente clinozoisita. Si se tiene en consideración las cantidades de hierro disponibles en las biotitas, son naturales las bajas concentraciones de clinozoisita, que se diferencia de la epidota por sus colores de interferencia de menor orden. Los minerales mencionados anteriormente en conjunto con pequeñas cantidades de cuarzo se encuentran rellenando espacios como bandas paralelas al clivaje. Lo anterior, se debe a la movilización del potasio ubicado entre las interestratificaciones de la estructura cristalina de la biotita, lo cual produce espacios y una reducción del volumen aproximada de 35% (Eggleton and Banfield, 1985).

- La **hornblenda** tiene habito prismático alargado anhedral a subhedral y esporádicamente se encuentran cristales con corte basal euhedrales hexagonales. Los tamaños varían entre 0.4 mm y 3 mm, el pleocroísmo es intenso con tonos amarillos a verde oscuro y es común la presencia de maclas simples. La exfoliación es buena en dos direcciones a 56° - 124° y, en ocasiones, irregular en una dirección. La extinción es simétrica en los cristales con sección basal y los colores de interferencia corresponden al segundo orden, pero pueden estar enmascarados por el fuerte color del mineral. Está asociada con la biotita por

medio de intercrecimientos hacia los límites de los cristales. Desarrolla textura poiquilítica con el cuarzo y la plagioclasa. En los bordes y siguiendo los planos de exfoliación es común la alteración parcial a clorita, que en algunos casos exhibe colores de interferencia anómalos azules y violetas. Asociados a esta alteración se encuentran óxidos de hierro anhedral que pueden estar acumulados irregularmente en los planos de clivaje y tienen tamaños entre 0.1 mm y 0.6 mm, así como epidota y en menor medida clinozoisita. dependiendo de la disponibilidad de hierro.

- Los minerales accesorios incluidos a lo largo de toda la sección son el **circón, apatito** y óxidos de hierro, que debido a su habito y propiedades en microscopia de luz reflejada se clasificaron como magnetita. El circón es euhedral a subhedral prismático bipyramidal y redondeado, tiene tamaños entre 0.02 mm y 0.09 mm, relieve muy alto, colores de interferencia de tercer orden, puede contener microinclusiones y radiohalos. El apatito se encuentra comúnmente alrededor de los minerales máficos como cristales prismáticos alargados, aciculares y hexagonales, incoloros a verde claro, con tamaños entre 0.003 mm y 0.19 mm; las formas hexagonales corresponden a secciones basales y tienen comportamiento isotrópico. La magnetita tiene tamaños entre 0.1 mm y 0.5 mm, es anhedral y comúnmente desarrolla coronas titaníferas muy finas y discontinuas.

b. Venillas de magnetita

Las venillas se encuentran interconectadas entre sí, desarrollan leve textura brechoide, por lo que incorporan cristales de cuarzo y feldespatos pertenecientes a la roca caja, los cuales presentan tamaños entre 0.08 y 0.15 mm, formas angulares a subangulares y sin orientación evidente.

El **feldespato potásico** es anhedral con tamaños entre 0.9 y 1.5 mm, exhibe leve extinción ondulante y habitualmente presenta maclamiento según la Ley de Carlsbad, así como textura peritica en forma lamelas por procesos de exsolución. Se asocia con el cuarzo por medio de intercrecimiento y bordes sinuosos, formando textura gráfica incipiente. Se observa con aspecto sucio o “nuboso”, relacionado con el estado avanzado de alteración sericítica y, además, puede contener agregados muy finos de carbonatos. Esto es favorecido por la microporosidad propia de la pérdida de argón, ya que el potasio que compone este feldespato produce ^{40}Ar , el cual genera “burbujas” sobre la superficie del cristal y, por lo tanto, deja a su paso espacios vacíos. Por otro lado, la **plagioclasa** tiene formas subhedrales tabulares a anhedrales con tamaños entre 0.6 y 2.4 mm, leve extinción ondulante y maclamiento obliterado por la intensa alteración a sericita y calcita en forma de parches. Alrededor y dentro de estas venillas se sitúan cristales de pirita subhedral a euhedral y en concentraciones menores calcopirita anhedral.

Producto de la sobreimposición entre las alteraciones potásica y sericita-clorita, se encuentran venillas con textura brechoide $\text{Chl}+\text{Ser}+\text{Cb}+\text{Qz}$ subparalelas entre sí, con contenidos variables de dichos minerales, las cuales cortan las venillas de magnetita. Las microbrechas contienen cristales angulares a subredondeados, sin orientación evidente, con tamaños entre 0.07 y 0.1 mm, correspondientes a fracciones de la roca caja alterada y embebidos en una matriz clorítica con cantidades subordinadas de carbonatos. La alta

densidad de venillas desarrolla zonas locales de cizallamiento con cuarzo policristalino y cristales levemente alargados. Puntualmente, se observan aperturas o “jogs” que indican un componente de rumbo en el régimen de esfuerzos durante su formación. Asimismo, las venillas comúnmente son discontinuas y se emplazan a lo largo de planos de debilidad, como es el caso de planos de exfoliación y límites de cristales. Alrededor de dichas estructuras hay gran cantidad de apatitos prismáticos alargados y aciculares con tamaños entre 0.0027 y 1.2 mm.

La alteración sericita-clorita afecta selectiva e intensamente los minerales máficos y feldespatos, ya sea ígneos o resultado de la alteración potásica. La clorita se encuentra en agregados fibrosos muy finos que pueden ser radiales, con colores de interferencia anómalos y del segundo orden. Altera totalmente las biotitas y hornblendas, por lo que se encuentra como pseudomorfo en cristales de baja integridad. Asociados a este pseudomorfismo se observan siguiendo la dirección del clivaje cristales alargados de titanita y epidota-clinozoisita. Adicionalmente, hay hematita en agregados granulares, lo cual es correlacionable con condiciones de alta fugacidad de oxígeno. La sericita está asociada con la clorita mediante interestratificaciones en las venillas y cristales remplazados. Los feldespatos alteran intensamente a sericita y, en el caso de las plagioclasas, también a carbonatos en forma de parches, lo cual se debe al componente cálcico de estas. Los carbonatos son encontrados en agregados muy finos con relieve variable de bajo a medio al girar la platina, colores de interferencia del cuarto orden y, cuando el espesor de la venillas es considerable, se observan maclas simples. El cuarzo es anhedral con aspecto sucio por la gran cantidad de microinclusiones (IF, agujas de rutilo, apatito) y tiene dominios muy finos de subgranos con bordes serrados y abultados, debido a la recrystalización tipo “bulging”.

En microscopia de luz reflejada se describieron las propiedades ópticas y, por medio de estas, se identificaron los minerales metálicos.

La magnetita tiene coloración gris oscura con leves tonos marrones, no tiene pleocroísmo, es isotrópica y habitualmente tiene fracturamiento. La hematita tiene color gris claro con leves tonos azulados, pleocroísmo leve y es anisotrópica. En el interior y alrededor de las venillas con predominio de magnetita se encuentran cristales de pirita y calcopirita. La pirita tiene color amarillo claro, no es pleocroica, es isotrópica y debido a su elevada dureza exhibe relieve diferencial, por lo que sobresale con respecto a los minerales más blandos. La calcopirita es amarilla, no pleocroica, anhedral diseminada rellenando espacios y tiene anisotropía débil, ya que se debe aumentar la intensidad de iluminación para percibirla.

c. Estructuras de especularita

Tiene textura brechoide, esta genera reducción en el tamaño de los fragmentos de roca caja alterada, que tienen formas subangulares y en ocasiones leves alargamientos. La especularita tiene forma prismática alargada subhedral a euhedral, con tamaños de 0.02 a 1.6 mm y está orientada siguiendo patrones de flujo alrededor de los cuarzos y feldespatos. Incorporados y alrededor de las venillas se sitúan cristales de pirita subhedral cubica a masiva y en concentraciones menores calcopirita anhedral, la cual puede estar en contacto con la pirita. Estos sulfuros tienen un rango de tamaños muy variables entre 0.02 y 6.6 mm.

En microscopia de luz reflejada las características de los minerales mencionados anteriormente son las siguientes: la especularita es gris clara a levemente oscura, tiene pleocroísmo leve y es anisotrópica; la pirita es de color amarillo claro, no es pleocroica, es isotrópica y tiene relieve diferencial por su elevada dureza, así como un aspecto oqueroso por las condiciones de pulido de la sección delgada; la calcopirita es amarilla, no pleocroica.

Hacia los bordes y ligeramente en el interior de los cristales se observa oxidación con tonalidades rojizas por procesos supérgenos. Asociado al proceso de relleno hidrotermal se encuentra cuarzo idiomórfico con secciones hexagonales, extinción paralela y tamaños de 0.06-1.0 mm.

Las plagioclasas son anhedrales y subhedrales tabulares con tamaños variables entre 0.08 y 2 mm, aunque localmente hay fenocristales hasta de 4 mm. La extinción es ligeramente ondulante y hay zonación composicional concéntrica, que se aprecia con mayor claridad en NX al rotar la platina. El tipo de maclamiento es polisintético, periclina y albita-carlsbad, pero por lo general está obliterado por el grado de alteración. Hay desarrollo de textura poiquilítica con inclusiones de biotita y hornblenda. Por lo que se refiere al feldespato potásico, se relaciona con la plagioclasa por medio de contactos sinuosos e intercrecimientos leves. Los cristales son anhedrales con tamaños entre 0.8 y 2.2 mm, la extinción es ligeramente ondulante, desarrolla textura poiquilítica con inclusiones de hornblenda y tiene abundantes pertitas en forma de llamas. Forma textura intersticial con el cuarzo, caracterizada por terminaciones triangulares en ángulo. Los cristales de cuarzo son anhedrales con tamaños entre 0.05 y 1.4 mm, los cuales disminuyen en zonas donde se acumula la especularita. La extinción es ondulante y tiene recristalización tipo “bulging” con bordes aserrados y abultamientos en bordes de subgranos. Tiene un aspecto sucio debido al elevado número de microinclusiones conformadas por inclusiones fluidas y cristales aciculares de rutilo y apatito.

Las cristales de biotitas son subhedrales tabulares y anhedrales con baja integridad, tienen tamaños entre 0.4 y 1.6 mm, y colores de interferencia del segundo orden que pueden estar enmascarados por el pleocroísmo intenso amarillo claro a marrón rojizo. Se encontró un cristal de biotita alterando en su mayoría a moscovita según la dirección de clivaje, la cual

se diferencia de la sericita por su mayor tamaño. La moscovita y biotita tienen redes cristalográficas similares, como es el caso del plano basal (001). Con respecto a la hornblenda, los cristales son subhedrales prismáticos y anhedrales, los tamaños varían entre 0.4 y 1.8 mm, tiene exfoliación característica perfecta en dos direcciones e imperfecta en una dirección y colores de interferencia del segundo orden enmascarados por el pleocroísmo intenso. Contiene maclas simples y desarrolla textura poiquilítica, englobando minerales aledaños.

Referencias bibliográficas

Eggleton, R. and Banfield, J. (1985) The alteration of granitic biotite to chlorite. *American Mineralogist*, 70(1985), 902-910. [AM70_902.pdf \(minsocam.org\)](#)

Heredia, S. (2011). Experiencias sobre corrosión en metales de uso cotidiano. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias* 8(extra 4), 446-475. [10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2011.v8.iextra.14](#)

Petroigneá (2022). *Atlas de rocas ígneas: biotita-flogopita*. Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense de Madrid. [BIOTITA-FLOGOPITA – ATLAS DE ROCAS ÍGNEAS \(wordpress.com\)](#)