

## TÍTULO

## APLICACIÓN DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PORTÁTIL AL ESTUDIO DE ROCAS VULCANO-SEDIMENTARIAS ASOCIADAS A LAS MINERALIZACIONES DE SULFUROS MASIVOS DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA

MINA DE LA TORERERA (HUELVA)

## AUTORA

## Helga Cano Garzón

	Esta edición electrónica ha sido realizada en 2025
Tutor	Dr. Teodosio Donaire Romero
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster Universitario en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales (2023/24)</i>
©	Helga Cano Garzón
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2024





Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Para más información: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en

Universidad Internacional de Andalucía, 2025





TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN GEOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS RECURSOS MINERALES

# APLICACIÓN DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PORTÁTIL AL ESTUDIO DE ROCAS VULCANO-SEDIMENTARIAS ASOCIADAS A LAS MINERALIZACIONES DE SULFUROS MASIVOS DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA: MINA DE LA TORERERA (HUELVA)

Alumna: HELGA CANO GARZÓN

**Tutor: TEODOSIO DONAIRE ROMERO** 

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor de este Trabajo de Fin de Máster, D. Teodosio Donaire Romero, por aportarme todos los conocimientos adquiridos e ideas necesarias para la realización de este trabajo, por guiarme y ayudarme siempre que lo he necesitado durante meses, mostrando gran interés y confiando en mí.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a la empresa Sandfire Matsa por mi formación durante el período de prácticas, la información aportada para la realización de este Trabajo de Fin de Máster y las facilidades a la hora de acceder para el estudio del sondeo.

Asimismo, me gustaría agradecer a todos mis profesores de este máster que me han aportado muchos conocimientos, los cuales me han servido de gran ayuda para la realización de este trabajo y el aprendizaje de nuevos conocimientos.

Por último, me gustaría darle las gracias a mis familiares, pareja y amigos por todo el apoyo que me han dado siempre, por acompañarme y transmitirme más confianza en mí más que yo misma.





TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN GEOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS RECURSOS MINERALES

## APLICACIÓN DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PORTATIL AL ESTUDIO DE ROCAS VULCANO-SEDIMENTARIAS ASOCIADAS A LAS MINERALIZACIONES DE SULFUROS MASIVOS DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA: MINA DE LA TORERERA (HUELVA)

**Resumen:** Este trabajo Fin de Máster aborda la aplicación de la fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) al estudio de rocas encajantes asociadas a las mineralizaciones de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica. Con este objetivo, se han seleccionado 330 muestras de diez sondeos (TRA-01 a TRA-10) realizados por MATSA en el sector de la mina de La Torerera. Estas muestras han sido analizadas por la empresa mediante cuatro métodos: 1) Método MAT1 (Digestión por Aqua Regia), 2) Método MAT3 (Digestión 4 ácidos), 3) Método ME-MS61 (Digestión 4 ácidos) y 4) Fluorescencia de Rayos X portátil (pXRF). En primer lugar, se han determinado los elementos analizados mediante pFRX que muestran buenas correlaciones con los datos obtenidos en los laboratorios químicos. Posteriormente, se ha testificado un sondeo representativo (TRA-10) y se han caracterizando petrográficamente sus facies principales. Por último, se comparan los datos petrográficos con razones interelementales de elementos inmóviles obtenidos mediante pFRX que han mostrado una buena correlación. Los resultados muestran que la razón Zr/Ti permite diferenciar las diversas rocas encajantes de la mineralización con independencia de la alteración sufrida por éstas.

**Palabras-Clave:** Fluorescencia de Rayos X portátil, Faja Pirítica Ibérica, Relación Zr/Ti, mina Torerera, rocas volcánicas, sondeos.





TRABAJO FIN DE MASTER MASTER EN GEOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS RECURSOS MINERALES

## APLICATION OF PORTABLE X-RAY FLUORESCENCE TO THE STUDY OF VOLCANO-SEDIMENTARY ROCKS ASSOCIATED WITH MASSIVE SULFIDE MINERALIZATIONS OF THE IBERIAN PYRITE BELT: LA TORERERA MINE (HUELVA)

**Abstract**: This final Master Project tackles in the aplication of portable x-ray fluorescence (pXRF) to the study of host rocks associated to the mineralizations of massive sulfide of the Iberian Pyrite Belt. With this objective, 330 samples have been selected from ten surveys (TRA-01 a TRA-10) carried out by MATSA in the La Torerera Mine sector. This samples have been analyzed by the company using four methods: 1) Method MAT1 (Aqua Regia Digestion), 2) Method MAT3 (4 Acid Digestion), 3) Method ME-MS61 (4 Acid Digestion) and 4) Portable X-Ray Fluorescence (pXRF). First of all, the elements analyzed by pXRF have been determinated that show good correlations with the data obtained in chemical laboratoires. Subsequently, a representative survey (TRA-10) has been witnessed and its main facies have been petrographically characterized. Finally, petrographic data are compared with interelemental ratios of inmobile elements obtained using pXRF that have show a good correlation. The results show that the Zr/Ti ratio allows diferentiating the various host rocks of the mineralization regardless of the alteration suffered by them.

**Keywords:** Portable X-Ray Fluorescence, Iberian Pyrite Belt, Zr/Ti Ratios, Torerera Mine, Volcanic rocks, surveys.

## ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Objetivos	1
3. Área de estudio	2
3.1. Situación geográfica	2
3.2 Contexto Histórico	2
3.3. Contexto geológico	3
4. Metodología	5
4.1. Muestreo	5
4.2. Métodos analíticos	5
4.2.1. Digestión de aqua regia (MAT1)	5
4.2.2. Digestión 4 ácidos (MAT3 y ME-MS61)	6
4.2.3. Fluorescencia portátil de rayos X (pXRF)	6
5. Programas informáticos empleados: Gcdkit	7
6. Resultados y discusión	8
6.1. Petrografía	8
6.1.1. Principales facies vulcano-sedimentarias	9
6.1.2. Columna litológica	11
6.2. Geoquímica	12
6.2.1. Correlación entre análisis de laboratorios y análisis	
mediante fluorescencia portátil	12
6.2.2. Correlaciones de elementos con el S	14
7.Conclusiones	19
8. Referencias bibliográficas	20
9. Anexos	22

## 1. Introducción

La Faja Pirítica Ibérica (FPI) está formada por más de 80 depósitos conocidos que contienen más de 1700 Mt de sulfuros masivos (extraídos y reservas) y es una de las mayores concentraciones terrestres (Leistel et al., 1998).

Estos depósitos de sulfuros masivos vulcanogénicos (VMS), que representan una fuente importante de metales base (Cu, Zn y Pb), metales preciosos (Au y Ag) y otros metales de interés económico (por ejemplo, Co, Sn, In, Cd, Se, TI, Ga, Sb, Bi) (Guillem et al., 2021), se relacionan con determinados tipos de rocas encajantes que necesitamos reconocer por su interés durante las campañas de exploración y testificación de sondeos.

Durante dichas campañas, las empresas realizan las correlaciones basándose principalmente en descripciones petrográficas *de visu* de estas rocas; sin embargo, existen multitud de rocas cuyo tamaño de grano (rocas afídicas o microcristalinas) o las alteraciones superpuestas hacen difícil su clasificación. Para poder diferenciarlas, existen técnicas como la pXRF, que constituye una herramienta de fácil uso complementaria a las descripciones petrográficas. En este trabajo se evalúa el uso de este método durante estos estudios, aplicándose a un sector de la Faja Pirítica Ibérica: Mina la Torerera.

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es determinar el uso de la pXRF como herramienta de información en los estudios de la FPI.

Para cumplir dicho objetivo se han planteado los siguientes objetivos parciales:

-Estudio de una secuencia litogeoquímica representativa del área de La Torerera (FPI).

-Estudio petrográfico de muestras *de visu* correspondientes a las principales facies.

-Estudio petrográfico óptico de láminas delgadas correspondientes a diversas facies.

-Estudio comparativo entre los datos obtenidos en laboratorio por diversos métodos con los datos de la pFRX e indicar qué elementos muestran mejores correlaciones.

-Determinar los parámetros químicos que pueden emplearse para discriminar los diversos tipos de rocas.

## 3. Área de estudio

#### 3.1. Situación geográfica

La zona de estudio se encuentra ubicada geográficamente en el poblado la Torera o Torerera, localizado en la provincia de Huelva, al sur del término municipal de Calañas, (situado a 64 km al norte de la capital onubense) y de la Sierra del Alamillo.

Los diferentes sondeos realizados en la Torerera, cuyos datos son utilizados para la elaboración de este TFM, se sitúan próximos a la carretera HU-9020 y el Embalse del Riscoso (Fig.1). El sondeo estudiado en este trabajo es el TRA-10, cuyas coordenadas son las siguientes: X: 685653,347; Y: 4163598,810.



**Figura 1**. Situación geográfica de la zona de estudio. Figura obtenida del Visor del IGME (Instituto Geológico y Minero de España). El rectángulo marcado de color negro representa el área estudiada y sus coordenadas geográficas. La estrella negra marca la posición del sondeo TRA-10.

#### 3.2 Contexto Histórico

La Torerera fue un poblado que nació y desapareció con la actividad minera en el siglo XX. La explotación en la mina se inició en el año 1911, distinguiéndose dos etapas (Carnero Ortiz, s.f.): la Mina de Pirita de la Geinco (UEE) y la Fábrica de Explosivos de los Milanos de la UEE.

La concesión como mina de manganeso comenzó en 1906 y posteriormente, la Unión Española de Explosivos (UEE) compra la concesión en 1911, iniciándose los trabajos

de investigación a través de su filial GEINCO (Sociedad General de Industria y Comercio).

Se realizaron tres pozos, los dos primeros de 50 metros de profundidad, se ubicaron al sur de la concesión, y el tercero de 115 m, al norte de la concesión; reconociéndose distintos niveles de profundidad en 1916 (35-110). En el nivel 86 se encuentra la masa mineral de 185 m de longitud y una potencia media de 23m.

En 1921 la mina se reconoció completamente hasta el nivel 140 y se perfeccionaron sus instalaciones; comenzando la producción del mineral en 1925 con la extracción de 10000 tn de 1,2% cobre y 44% de azufre.

En los años sucesivos se alcanzó la máxima producción de mineral a 75000 tn, paralizándose su producción en 1931 con un total de 234000 tn.

A partir de los años treinta, se iniciaron nuevos proyectos para la Torerera como la construcción de una fábrica de explosivos subterránea utilizando la pirita como materia prima y se ampliaron sus instalaciones. La producción en la fábrica "Los Milanos" comenzó en el año 1946, alcanzándose 1317 tn de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 161 tn de HNO<sub>3</sub> y 322 toneladas de explosivos.

En el año 1947 la mina se encuentra ya explorada en diversos niveles (32, 54, 86, 111 y 140), cuyas reservas eran de 750000 tn de pirita con leyes de 1,03% de cobre y 42,24% de azufre; comenzando a producir en 1949, empleándose el método de explotación de fajas horizontales con relleno completo.

En 1951 la falta de materias primas limitó la producción anual, manteniéndose una cifra de 1000 tn. Con la producción de trillita trayendo se produjo un incremento en la producción pasando de 2100 tn en 1955 a 3500 tn en 1958.

El declive de la mina se produjo en 1962 con el cierre de la planta de ácido sulfúrico y posteriormente la fábrica de nitroglicerina en el año 1971, desmantelándose todas las instalaciones y poniendo fin definitivamente a la actividad minera en la Torerera en 1973.

#### 3.3. Contexto geológico

Desde el punto de vista geológico, la Torerera se encuentra situada en la Zona Sudportuguesa (zona geológica más meridional del Macizo Ibérico). Se extiende desde el Suroeste Portugués hasta la Sierra Norte de Sevilla.

La Zona Sudportuguesa se encuentra constituida por rocas de edad Devónico Superior al Carbonífero medio. En ella, se distinguen cinco dominios geológicos en función de sus características litológicas, estructurales y paleogeográficas, que, de norte a sur, son: 1) Dominio Pulo do Lobo, 2) Faja Pirítica Ibérica, 3) Dominio del Suroeste Portugués, 4) El Batolito de la Sierra Norte de Sevilla y 5) La Cuenca Pérmica del Viar.

En la FPI se localiza la zona estudiada y es el dominio más interesante desde el punto de vista económico. La secuencia estratigráfica se divide en tres unidades litoestratigráficas que de muro a techo son:1) Grupo PQ del Devónico Superior. 2) El Complejo Volcánico-Sedimentario (CVS) del Fameniense intermedio-tardío a Viseense tardío, constituido por rocas magmáticas y sedimentarias que albergan los depósitos de sulfuros masivos. 3) Formación turbidítica de facies CULM o Grupo CULM del Viseense tardío a Westfaliense temprano (Carbonífero) (Inverno et al., 2008, Leistel et al., (1988)).

El sector de La Torerera se sitúa dentro del CVS y está constituido por rocas procedentes de un vulcanismo bimodal submarino en el que predominan rocas volcánicas y subvolcánicas de composición félsica (riolitas y dacitas), intermedias y básica (basaltos) y rocas piroclásticas (tobas, brechas, tufitas, lavas y aglomerados) (Figura 2). Las rocas sedimentarias coetáneas con el vulcanismo son fundamentalmente pizarras y cherts (Figura 2) (IGME, 2015).



**Figura 2.** Mapa geológico del área estudiada y localización de los sondeos realizados por MATSA. Fuente: Visor del IGME (Instituto Geológico y Minero de España)

La mina La Torerera se encuentra situada estructuralmente en el flanco inverso cizallado de un sinclinal menor localizado dentro del flanco sur del Anticlinorio Valverde del Camino (Figura 3.). Las pizarras negras que constituyen la roca encajante de los depósitos se encuentran sometidas a una intensa deformación, atribuida principalmente a las diferencias en su comportamiento mecánico con respecto a los sulfuros masivos (Sáez et al.,2008).



Según Sáez et al. (2008), las palinofloras de las muestras de La Torerera sugieren un ambiente deposicional marino, incluyendo palinomorfos tanto terrestres como marinos.

La asociación de estos palinomorfos sugiere su atribución a la Biozona LN, correspondiente a la biozona de esporas del Devónico Superior en Europa Occidental. En términos cronoestratigráficos, la Biozona LN tiene un límite superior que coincide aproximadamente con el límite Devónico/Carbonífero. Por ello, se puede asignar una edad devónica tardía (Fameniense superior o Estrunienese) a la secuencia de pizarras de La Torerera. Cabe destacar que las palinofloras de La Torerera son coetáneas con las descritas a partir de la secuencia de pizarras que alberga los depósitos gigantes de Neves-Corvo, Aznalcóllar, Tharsis y Sotiel-Coronada (Sáez et al., 2008).

#### 4. Metodología

#### 4.1. Muestreo

Para llevar a cabo este TFM, la empresa Minera Sandfire Matsa ha proporcionado datos químicos obtenidos a partir del muestreo de diez sondeos perforados previamente en Mina la Torerera. Como parte del estudio, se ha llevado a cabo la elección de un sondeo (TRA-10) y selección de 330 muestras representativas de todos los sondeos para la realización de los análisis químicos de las rocas y elaboración de láminas delgadas.

#### 4.2. Métodos analíticos

La investigación geoquímica de las rocas se ha realizado a partir de los análisis químicos obtenidos por cuatro métodos denominados MAT1, MAT3, ME-MS61 y pXRF.

#### 4.2.1. Digestión de aqua regia (MAT1)

El método denominado MAT1 es una digestión de Aqua Regia realizado por el laboratorio de la empresa minera Sandfire Matsa y consiste en una mezcla oxidante constituida por concentraciones de ácidos nítrico (HNO<sub>3</sub>) y clorhídrico (HCI) en relación 1:3. Este método se aplica a bajas temperaturas, permitiendo que el Hg, elemento volátil

a mayor temperatura, pueda ser analizado al mismo tiempo que el resto de elememtos. La digestión de Aqua Regia se utiliza para disolver sulfuros metálicos, la mayoría de los sulfatos, carbonatos, fosfatos, elementos como el Au, Pt, Pd, telururos, arseniuros, seleniuros. Sin embargo, algunos silicatos y aluminosilicatos son atacados parcialmente por la digestión (https://www.alsglobal.com/es/geochemistry/generativeexploration/aqua-regia-digestions).

#### 4.2.2. Digestión 4 ácidos (MAT3 y ME-MS61)

El método denominado MAT3 consiste en una digestión 4 ácidos realizado por el laboratorio de la empresa minera Sandfire Matsa en las muestras representativas de los sondeos TRA-07, TRA-08, TRA-09 y TRA-10, desde la muestra 134 a 300.

El método denominado ME-MS61 consiste en una digestión 4 ácidos realizado por el laboratorio ALS en las 300 muestras representativas de los sondeos TRA-01, TRA-02, TRA-03, TRA-04, TRA-05, TRA-06, TRA-07, TRA-08, TRA-09 y TRA-10.

Una digestión 4 ácidos es una combinación de ácidos nítrico (HNO<sub>3</sub>), perclórico (HClO<sub>4</sub>), fluorhídrico (HF) con una etapa de disolución de ácido clorhídrico (HCl). Esta digestión se descompone en minerales de silicatos y óxidos que permite recuperar la mayoría de minerales y analitos. Esta técnica minimiza la pérdida de elementos volátiles como As, Se, Sb, Te y Tl (<u>https://www.alsglobal.com/es/geochemistry/generative-exploration/four-acid-digestions</u>).

#### 4.2.3. Fluorescencia portátil de rayos X (pXRF)

La pXRF se ha realizado en la empresa minera Sandfire Matsa utilizando un analizador portátil de fluorescencia de rayos X denominado "Vanta X-Ray Fluorescence Analyzer". Consiste en un método analítico instrumental que nos permite realizar la identificación y análisis de elementos contenidos en muestras de testigos de sondeos (desde Mg hasta U), expuestos a una radiación de rayos X (Olympus, 2020).

El analizador pórtatil de fluorescencia de rayos X Vanta consta de varios componentes representados en la Figura 4. Los rayos X son emitidos desde una fuente (tubo de rayos X), que genera el haz primario. Este haz primario presenta la energía suficiente para expulsar electrones de los orbitales más internos, generando que un electrón del orbital externo se mueva rellene el espacio vacante del orbital interno, emitiendo un haz secundario de rayos X.

El indicador de rayos se localiza en la parte trasera superior del analizador XRF Vanta y puede verse desde la parte superior, los costados y la parte superior. Este indicador avisa del estado del tubo de rayos X, si se encuentra parpadeando en color rojo quiere decir que el tubo de rayos está emitiendo radiación a través de la ventana de medición; si se encuentra encendido en color rojo fijo quiere decir que el tubo de rayos X está habilitado, pero el analizador XRF no emite radiación de rayos X.

En la ventana de medición se coloca la muestra para ser analizada y permite el paso del haz de rayos x desde la fuente hacia la muestra.

El equipo Vanta presenta varios controles externos que operan ciertos aspectos del analizador XRF. Estos controles son los siguientes: el botón de encedido (enciende y apaga el analizador Vanta), el disparador (inicia una prueba), la palanca de mando (mueve el foco de un elemento de la pantalla a otro) y el botón de atrás (mueve el foco al campo de datos anterior en la interfaz de usuario).



**Figura 4.** Partes de un analizador de fluorescencia de rayos X Vanta: 1) Sonda. 2) Ventana de medición. 3) Placa de ventana. 4) Conector de acoplamiento. 5)Gatillo. 6) Manija. 7) Batería. 8) Cubierta de acceso al conector. 9) Indicador de advertencia de rayos x. 10) Pantalla táctil de interfaz al usuario. 11) Botón de atrás. 12) Palancas de mando. 13) Botón de encendido. Figura obtenida de: Olympus, 2020.

La pXRF es un método idóneo para realizar los análisis geoquímicos por su rapidez, portabilidad, fácil uso, sus análisis no destructivos y resultados cuantitativos; Sin embargo, se debe tener en cuenta las siguientes limitaciones (Olympus, 2020):

-Aplicación a un rango específico de elementos.

-Límites de detección mayor a los obtenidos con métodos de laboratorio.

-Resultados afectados por la propia muestra. Por ejemplo: el recipiente, humedad, heterogeneidad, la matriz de la muestra.

-Emisión de rayos X. Es necesario establecer y cumplir los protocolos de seguridad correctamente, para que este método se considere seguro.

-Obtención de datos elementales, no de componentes ni óxidos.

### 5. Programas informáticos empleados: Gcdkit

Para el procesamiento de los datos geoquímicos de los sondeos estudiados, se ha utilizado el Kit de herramientas de datos geoquímicos (Geo Chemical Data Tool Kit) o GCDKIT. Este programa consiste en un paquete de software basado en R, diseñado para el manejo y recálculo de rocas ígneas (https://www.gcdkit.org/). Sus principales características incluyen:

-Procesamiento de datos, así como, importación de datos en diferentes formatos y realización de cálculos geoquímicos estándar (normalizaciones, determinación del coeficiente de correlación lineal).

-Realización de diagramas gráficos que nos permite analizar elementos mayores y trazas (spider plots, binary plots, ternary plots).

-Clasificación de las rocas (Diagrama TAS, Winchester y Floyd (1977), etc.)

-Establecer modelos geoquímicos como modelos de cristalización fraccionada y modelos de mezcla magmática y asimilación.

-Facilidad para ampliar y modificar datos.

-Gestión eficaz de datos (búsqueda y agrupación).

#### 6. Resultados y discusión.

#### 6.1. Petrografía

Con el objetivo de estudiar la petrografía, se ha seleccionado un sondeo representativo, denominado TRA-10, cuya columna litogeoquímica se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Columna litogeoquímica, con la localización de las muestras de láminas delgadas y la relación Zr/Ti de las diferentes facies vulcano-sedimentarias estudiadas en el sondeo TRA-10 de Mina La Torerera.

En el sondeo TRA-10 se han identificado las principales facies vulcano-sedimentarias. De estas, se han tomado muestras de visu para su descripción y elaboración de láminas delgadas (descritas en los anexos 1 y 2), con el objetivo de realizar un análisis detallado mediante la microscopia óptica de luz transmitida. Para la elaboración de la columna litológica de este sondeo se han empleado los datos aportados por la empresa, manteniendo su terminología.

6.1.1. Principales facies vulcano-sedimentarias.

Las principales facies vulcano-sedimentarias del Complejo Volcánico-Sedimentario (CVS) que podemos identificar en el sondeo se enumeran a continuación:

 Facies coherentes básicas: Muestran una textura afanítica con abundantes microcristales de piroxeno y plagioclasa de tamaño inferior a 1mm. Estas facies se encuentran finamente laminadas y poseen venas de cuarzo. Además, presentan una alteración silícea y clorítica (Figura 6).



Figura 6. Lámina delgada observada en el microscopio referente a una roca básica.

 Facies coherentes riolíticas: Muestran textura afanítica porfídica con escasos fenocristales de feldespatos albitizados y cuarzo. Comúnmente presentan una fracturación perlítica e hialoclastitas in situ. En algunos sectores poseen venas de cuarzo y vacuolas, constituyendo una textura amigdaloide (Figura 7).



**Figura 7.** Lámina delgada observada en el microscopio óptico referente a una riolita con fracturación perlítica.

 Facies de brechas: Muestran fragmentos de cristales de feldespatos y fragmentos líticos con tamaño de grano muy fino. Son clasto- y matrizsoportadas (Figura 8).



**Figura 8.** Lámina delgada observada en el microscopio óptico referente a una brecha polimíctica.

10

 Facies de arenisca feldespática/toba: Muestran fragmentos de cristales de feldespatos y fragmentos líticos de tamaño de grano fino y ocasionalmente de tamaño centimétrico. Poseen una alteración sericítica, silícea y clorítica. Son clasto- y matriz- soportadas (Figura 9).



**Figura 9.** Lámina delgada observada en el microscopio óptico referente a una arenisca feldespática/toba.

- Facies de Pizarras (s.l.): Muestran diferentes tipos de alteración (silícea, sericítica y clorítica) y poseen venas de cuarzo. En algunos niveles se observan diseminaciones de pirita.
- Facies de Pizarras moradas: Muestran alteración hematítica y sericítica. Estas facies se encuentran interestratificadas por niveles finos de tufitas verdes y poseen venas de cuarzo de tamaño muy fino.
- Facies de sulfuros masivos: Consisten en una mineralización de tipo Stockwork, caracterizado por venas y vetillas de pirita distribuidos de forma irregular, rellenando fracturas en la roca huésped.

#### 6.1.2. Columna litológica

En este apartado se desarrolla el análisis detallado de la columna litológica referente al sondeo TRA-10 de Mina La Torerera.

Inicialmente esta columna comienza en su base, situada a 420 m de profundidad, con pequeños niveles de pizarras grises y negras con intercalaciones de facies coherentes andesíticas a básicas. Hacia techo, aproximadamente a una profundidad de 295m, dentro de los niveles de pizarras negras se encuentran paquetes potentes de facies coherentes ácidas y niveles de sulfuros masivos suprayacentes a dichas facies.

A 245 m de profundidad, se localizan niveles de pizarras grises y negras con potentes niveles de areniscas volcánicas/tobas. Avanzando en la secuencia hacia techo, dentro de los niveles de pizarras negras, se disponen cuerpos potentes de facies coherentes de composición ácida y andesítica.

En la parte superior de la columna, aproximadamente a 120 m de profundidad, se encuentra una secuencia vulcanoclástica compuestos por una transición de niveles tufíticos verdes y pizarrosos, de color morado (pizarras moradas) y gris menos potentes hacia niveles más potentes de areniscas/toba y brechas.

#### 6.2. Geoquímica

6.2.1. Correlación entre análisis de laboratorios y análisis mediante fluorescencia portátil.

En los siguientes apartados se describirán las correlaciones obtenidas a partir de la comparación de datos elementales analizados mediante distintos métodos, estableciendo cuáles son los elementos que presentan mayor correlación con la fluorescencia portátil de rayos x (pXRF).

#### 6.2.1.1. Comparación pXRF vs. Método ME-MS61

A partir de los datos obtenidos de los análisis químicos descritos anteriormente, se han determinado los coeficientes de correlación lineal entre las concentraciones de cada elemento analizados en los métodos de Digestión 4 ácidos (ME-MS61) y pXRF.

En la figura ubicada en el Anexo 3 se comparan las concentraciones de los elementos mayoritarios (Fe, Mg, Ca, K y Al) y menores (Mn, Ti y P) obtenidas mediante estos dos métodos. Hay que añadir que entre los elementos mayoritarios no se incluyen los elementos Na y Si, debido a que estos no fueron analizados con ambos métodos. Por ejemplo, el Na fue analizado únicamente mediante los métodos de laboratorio, mientras que el Si, se determinó solamente a través de la Fluorescencia portátil de Rayos X (pXRF).

Al representar el estudio comparativo, ha permitido identificar buenas correlaciones entre los datos de laboratorio ME-MS61y pXRF para los elementos Fe, Ca, K, Mn y P. Por el contrario, los datos obtenidos para el Mg y Al no muestran buena correlación (Ver Tabla 1).

En la Figura ubicada en el Anexo 4 se comparan las concentraciones obtenidas de los elementos traza mediante los métodos ME-MS61 y pXRF. Hay que añadir que entre los elementos traza analizados, no se incluyen los siguientes elementos: Li, Cs, Be, Ge, In, Hf, Ta, Au, Ga y TI, Nd, Pr y Hg, debido a que estos no se analizaron con ambos métodos.

El estudio comparativo para los elementos traza ha permitido identificar los siguientes como aquellos con mejor correlacion: Zr, Rb, Pb, Cu, Cd, Co, Sr, Sb, Ni, Cr, V, Se, Mo, Zn, As, Nb, Y, Sn, y Bi (Tabla 1). Sin embargo, los datos de laboratorio referentes a los elementos: Ba, U, Ag, S, La,Ce y W, no se correlaccionan bien con los datos de pXRF.

#### 6.2.1.2. Comparación pXRF vs. Método MAT1.

En el Anexo 5 se observan las concentraciones de los elementos mayoritarios y elementos menores, obtenidas mediante el Método Digestión por Aqua Regia (MAT1)

y pXRF. Hay añadir que entre estos elementos no se encuentran los siguientes: Mg, Al, K, Ca, P, Na, Si y Ti, debido a que estos no se analizaron con ambos métodos.

El estudio comparativo para los elementos mayores y menores ha permitido identificar el elemento Fe como aquel con mejor correlación entre los datos de laboratorio MAT1 y pXRF. Sin embargo, los datos de laboratorio referentes al Mn, no muestran buena correlación con los datos de pXRF.

En la Figura del Anexo 6 se comparan las concentraciones de los elementos traza, obtenidas mediante los métodos MAT1 y pXRF. Los elementos traza comparados fueron los siguientes: Ag, As, Sb, Bi, Hg, Ni, Se, Ba, Cu, Zn, Pb, S, Cd y Co.

El estudio comparativo para los elementos traza ha permitido la identificación de estos elementos como aquellos con mejor correlación entre los datos de laboratorio MAT1 y pXRF: As, Sb, Bi, Se, Cu, Ni, Zn, Pb y S (Tabla 1). Sin embargo, para los elementos siguientes: Ag, Ba, Hg, Cd y Co, las correlaciones entre ambos métodos no fueron buenas.

#### 6.2.1.3. Comparación pXRF vs. Método MAT3.

En la Figura del Anexo 7 se comparan las concentraciones de los elementos mayoritarios y elementos menores, obtenidas mediante el Método Digestión 4 Ácido (MAT3) y pXRF. Hay que añadir que entre estos elementos no se encuentran los siguientes: Na, Si, P debido a que estos no se analizaron con ambos métodos.

El estudio comparativo para los elementos mayores y menores ha permitido identificar los elementos Fe, Ca, K, Ti y Mn como aquellos con mejor correlación entre los datos de laboratorio MAT3 y pXRF (Tabla 1). Sin embargo, los datos de laboratorio referentes a los elementos Mg y Al no muestran buenas correlaciones entre ambos métodos.

En la Figura del Anexo 8 se comparan las concentraciones de elementos traza, obtenidas mediante los métodos MAT3 y pXRF. Los elementos traza comparados con estos métodos fueron los siguientes: Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Sb, Se, Sr, V, Zn y Pb.

El estudio comparativo para los elementos traza ha permitido la identificación de estos elementos como aquellos con mejor correlación entre los datos de laboratorio MAT3 y pXRF: As, Mo, Bi, Cu, Cr, V, Sr, Ni, Pb y Zn (Tabla 1). Sin embargo, para los elementos siguientes: Ag, Cd, Co, Se, Sb, las correlaciones entre ambos métodos no fueron buenas.

6.2.1.4. Resumen de resultados de la comparación entre los datos de pXRF y los diversos métodos.

En la tabla 1 se representan los resultados de la comparación entre los datos de pXRF y los diversos métodos de laboratorio utilizados, estableciendo cuáles son aquellos elementos que muestran buenas correlaciones:

ELEMENTOS CON BUENAS CORRELACIONES						
Elementos Mayores	MAT1 VS pXRF	MAT3 VS pXRF	ME-MS61 VS pXRF			
Fe	0,99	0,84	1,00			
Са	-	0,90	0,98			
K	-	0,71	0,98			
Elementos menores	MAT1 VS pXRF	MAT3 VS pXRF	ME-MS61 VS pXRF			
Р	-	-	0,83			
Ti	-	0,84	0,97			
Elementos traza	MAT1 VS pXRF	MAT3 VS pXRF	ME-MS61 VS pXRF			
Zr	-	-	0,89			
Rb	-	-	0,97 0,92			
Pb	0,94	0,95				
Cu	1,00	0,89	1,00			
Sr	-	0,71	1,00			
Ni	0,80	0,84	0,94			
Cr	-	0,79	0,91			
V	-	0,78	0,91			
Sn	-	-	0,77			
Мо	-	1,00	1,00			
Zn	1,00	0,98	1,00			
As	1,00	0,95	1,00			
Nb	-	-	0,91			
Y	-	-	0,92			
Bi	0,78	0,86	0,78			

**Tabla 1:** Coeficientes de correlación lineal de elementos con buenas correlaciones entre los métodos de laboratorio y la fluorescencia portátil de rayos x.

El estudio comparativo entre elementos mayores, menores y elementos traza, ha permitido identificar aquellos elementos con mejor correlación entre pXRF y los métodos de laboratorio. Estos elementos son los siguientes: Fe, Ca, K, Ti, Zr, Rb, V, Y, Nb, Cr, Sr, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Bi, y Sn.

En cuanto a la diferencia con los datos totales, se observan que los valores obtenidos mediante fluorescencia portátil de rayos x (pXRF) no coinciden exactamente con los valores determinados en laboratorio. Por esta razón, lo recomendable es emplear razones interelementales, que nos permitan establecer una interpretación más fiable de los datos químicos.

#### 6.2.2. Correlaciones de elementos con el S.

En este apartado se presentan las correlaciones entre elementos calcófilos, y su comportamiento en relación con los sulfuros. Estos elementos presentan patrones de distribución específicos en ambientes geológicos para comprender procesos mineralógicos, metalogénicos y geoquímicos. Hay que añadir que estos elementos no se utilizan para la caracterización de rocas encajantes, puesto que estos elementos se emplean principalmente para definir los sistemas mineralizados. Los elementos calcófilos estudiados son los siguientes: Cu, As, Co, Ni, Pb, Zn, Cr y sus resultados se muestran en la figura del Anexo 9.

Mediante el programa GCDKIT se ha determinado que los elementos Cu, As,y Co presentan la mejor correlación con el S en los análisis realizados por la pXRF.

#### 6.2.3. Correlación entre razones de elementos inmóviles y litología.

En las rocas volcánicas alteradas podemos diferenciar los elementos móviles y elementos inmóviles. Los elementos mayores como Si, Fe, Mg, Ca, K y Na son muy solubles en los fluidos hidrotermales que interaccionan con la roca, comportándose en un proceso de alteración como elementos móviles. Los elementos inmóviles en un proceso de alteración son aquellos que son insolubles en los fluidos hidrotermales, por tanto, no son extraídos ni añadidos en la roca durante este proceso. Estos elementos nos permiten clasificar y correlacionar rocas volcánicas alteradas (Gifkins et al., 2005).

La Figura 10 representa la relación Zr/Ti para las rocas en los diferentes sondeos de la Torerera, siendo las muestras del sondeo TRA-10 marcadas de color rojo. Esta relación nos permite diferenciar las rocas félsicas (riolitas y dacitas), obteniendo para las riolitas una relación Zr/Ti situada entre 0,17 y 0,23 aproximadamente y en las dacitas una relación Zr/Ti entre 0'12 y 0'17. Por el contrario, las andesitas y rocas básicas muestran idéntica relación Zr/Ti (<0'05), lo que sugiere que podrían ser el mismo tipo de roca.

Para las rocas vulcanoclásticas (tobas y brechas) se observan variaciones de la relación Zr/Ti (desde 0,02 hasta 0,24), esto se debe a su composición polimíctica constituida por fragmentos procedentes de diferentes tipos de rocas; La mayoría de las tobas se describen como tobas ácidas a consecuencia del mayor contenido en Zr con respecto al Ti.

En las pizarras s.l. la relación Zr/Ti es baja, situada entre 0,02 y 0,12 y en las pizarras del Grupo PQ la relación Zr/Ti contiene menor variación que las anteriores.

Finalmente, los encajantes de los sulfuros masivos muestran una amplia relación Zr/Ti (desde 0,01 a 0,014) lo que sugiere que las rocas encajantes son fundamentalmente pizarras y rocas vulcanoclásticas.



**Figura 10.** Diagrama elaborado con el programa GCDKIT de la relación Zr/Ti en las rocas de los diferentes sondeos de la Torerera. Las muestras marcadas de color rojo corresponden al sondeo TRA-10.

La Figura 11 representa la relación Zr/Ti para las rocas correspondientes al sondeo TRA-10. A partir de este diagrama se pueden diferenciar las rocas félsicas (riolitas y dacitas), siendo mayor en las riolitas la relación Zr/Ti. Por el contrario, para las andesitas y rocas básicas se obtiene idéntica relación Zr/Ti (<0,05), lo cual no nos permite diferenciarlas y podrían tratarse de la misma roca.

Para las rocas vulcanoclásticas (brechas y tobas) se obtiene un amplio rango de variación de la relación Zr/Ti (desde 0,04 a 0,24) debido a su composición polimíctica, sin embargo, en este sondeo sólo dos muestras corresponden a una brecha. Para las pizarras (s.l.) se obtiene una relación Zr/Ti baja (entre 0,03 y 0,08), asímismo, no se observan muestras pertenecientes a las pizarras del Grupo PQ.

Finalmente, sólo aparece un dato de la roca encajante de los sulfuros masivos en la cual la relación Zr/Ti es baja (0'05), corresponde a una pizarra o toba.



**Figura 11.** Diagrama elaborado con el programa GCDKIT de la relación Zr/Ti en las rocas del sondeo TRA-10.

La Figura 12 representa la relación Zr/V para las rocas en los diferentes sondeos de la Torerera, un valor alto de esta relación corresponde a rocas félsicas, mientras que en rocas de composición máfica la relación Zr/V disminuye. Con este diagrama se obtiene la misma relación Zr/V para las andesitas y las rocas básicas, por tanto, no podemos diferenciarlas. Asimismo, no cabe la distinción de la mayoría de las rocas félsicas (riolitas y dacitas), debido a la similitud de la relación Zr/V en las muestras.

Para las rocas vulcanoclásticas (tobas y brechas), se ha obtenido un amplio rango de variación de la relación Zr/V debido a su composición polimíctica. Asimismo, en la mayoría de las rocas clasificadas como tobas, la relación Zr/V es alta, permitiéndose la definición de estas rocas como tobas ácidas.

En las pizarras (s.l.) y las pizarras referentes al Grupo PQ, muestran similar relación Zr/V (entre 0,5 y 3).

Finalmente, en las rocas encajantes de los sulfuros masivos se obtienen valores bajos de relación Zr/V, situados entre 0 y 5. Estos valores sugieren la clasificación de las rocas encajantes de los sulfuros como pizarras y tobas vulcanoclásticas.



**Figura 12.** Diagrama elaborado con el programa GCDKIT de la relación Zr/V en las rocas de los diferentes sondeos de la Torerera. Las muestras marcadas de color rojo corresponden al sondeo TRA-10.

La Figura 13 representa la relación Zr/V para las rocas correspondientes al sondeo TRA-10. Este diagrama no permite la diferenciación entre las rocas félsicas, a consecuencia de la similitud de los valores obtenidos de la relación Zr/V para las riolitas y las dacitas.

Para las rocas básicas y las andesitas se ha obtenido una relación Zr/V de 0,5 y 0,6, respectivamente lo cual nos puede permitir su diferenciación; no obstante, para este sondeo sólo se ha estudiado una muestra de cada una de estas rocas.

Para las rocas vulcanoclásticas, la relación Zr/V es variable desde 1,5 hasta 8, a consecuencia de su composición polimíctica.

En las pizarras (s.l.) la relación Zr/V disminuye, cuyos valores oscilan entre 1 y 3.

Los encajantes de los sulfuros masivos muestran una relación Zr/V=1, por tanto, la ronca encajante podría corresponder a una pizarra o una toba vulcanoclástica.



**Figura 13.** Diagrama elaborado con el programa GCDKIT de la relación Zr/V en las rocas del sondeo TRA-10.

A partir de los diagramas representados anteriormente, se puede concluir que el diagrama de la relación Zr/Ti es el más indicado para diferenciar los tipos de rocas estudiadas en los sondeos referentes a la mina La Torerera.

#### 7.Conclusiones

-Las comparaciones entre los datos de laboratorio obtenidos indican que los elementos Fe, Ca, K, Ti, Zr, Rb, V, Y, Nb, Cr, Sr, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Bi, y Sn, muestran buenas correlaciones con los datos obtenidos mediante la fluorescencia portátil de rayos x (pXRF). Esto nos indica que estos elementos podrían ser empleados para el estudio químico de los sondeos.

-De todos estos elementos, se han obtenido buenas correlaciones entre el S y los elementos Cu, As, y Co.

-La razón Zr/Ti en fluorescencia portátil de rayos x (pXRF) nos permite diferenciar entre riolitas, dacitas y andesitas/rocas básicas. Esta razón nos permite correlacionar rocas coherentes de otros sondeos. Por ejemplo, algunas rocas descritas inicialmente como dacitas en los sondeos TRA-2 y TRA-5 son en realidad riolitas con fracturación perlítica similares petrográfica y químicamente a las descritas en TRA-10.

-Los estudios petrográficos y geoquímicos nos indican la similitud entre las rocas básicas y las rocas descritas como andesitas.

-Se sugiere que las variaciones de la razón Zr/Ti mostradas por brechas y areniscas/tobas son debidas al carácter polimíctico de estas rocas vulcanoclásticas.

-Las pizarras (*s.l.*) también tiene razones Zr/Ti específicas diferentes de las facies coherentes diferenciadas.

-Según la relación Zr/Ti, sugiere que el material encajante de los sulfuros masivos podría corresponder fundamentalmente con pizarras y rocas vulcanoclásticas.

-La columna litológica muestra un magmatismo básico en la base de la secuencia. Este magmatismo, poco aflorante en superficie podría interpretarse como precursor de la actividad magmática en este sector.

## 8. Referencias bibliográficas

-Carnero Ortiz F. (s.f.): Reseña histórica de la mina y de la fábrica de explosivos de la Torerera (Calañas, Huelva). 16 p.

-Gifkins, C., Herrmann, W, Large, R., (2005): Altered Volcanic Rocks a guide to description and interpretation. Published by the Centre for Ore Deposit Research. University of Tasmania, Australia. 276 p.

-Guillem, G., Tornos, F., Losantos, E., Pons, J.M., Videira, J.C., (2021): Vectors to ore in replacive volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits of the northern Iberian Pyrite Belt: mineral zoning, whole rock geochemistry, and application of portable X-ray fluorescence. *Solid Earth*. European Geosciences Union.V.12, 1931-1966. https://doi.org/10.5194/se-12-1931-2021.

-Inverno C. MC., Solomon, M., Barton, Mark, D., Foden, J. (2008): The Cu Stockwork and Massive Sulfide Ore of the Feitais Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Aljustrel, Iberian Pyrite Belt, Portugal: A Mineralogical, Fluid Inclusion, and Isotopic Investigation. Society of Economics Geologist V.103, 241-267 p.

-Leistel, J.M, Marcoux, E., Thiéblemont, D., Quesada, C., Sánchez, A., Almodóvar, G.R., Pascual, E., Sáez, R.(1998): The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt. Mineralium deposita, 33:2-30 p.

-Olympus Scientific Solutions America (2020): Vanta Familiy X-Ray Fluorescence Analyzer. User's manual. DMTA-10072-01N. Recuperado de: <u>https://hotrobotics.co.uk/wp-content/uploads/2021/07/Manual-DMTA-10072-01EN-</u> <u>Vanta-User-International.pdf</u> (2025).

-Sáez,R., Moreno, C., González, F., (2008): Synchronous deposition of massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt: New data from Las Herrerías and La Torerera orebodies. C.R. Geoscience 340, 829-839 p.

#### Páginas Webs

-https://www.alsglobal.com/es/geochemistry/generative-exploration/aqua-regiadigestions. -https://www.alsglobal.com/es/geochemistry/generative-exploration/four-acid-digestions.

-https://www.gcdkit.org/.

## 9. Anexos

## Principales tipos de facies en el sondeo TRA-10

FACIES	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Facies de brechas- areniscas volcánicas	Brecha volcánica compuesta por fragmentos de cristales de feldespatos y fragmentos líticos que son de tamaño de grano muy fino. Estas facies están estratificadas y poseen granuloclasificación normal, con los fragmentos más finos hacia la parte superior del sondeo. Las rocas son clasto a matriz soportadas.	
Facies de Tufitas verdes	Tufitas verdes con alteración clorítica+sericítica. Estas facies están finamente bandeadas por canales de clorita y poseen venas de cuarzo.	32
Facies de pizarras moradas	Pizarras moradas con alteración hematítica+sericítica. Estas facies están finamente bandeadas por niveles finos de tufítas verdes y poseen venas de cuarzo de tamaño muy fino.	51
Facies de pizarras y grauvacas (Grupo CULM)	Pizarras grises en alternancia con paquetes de grauvacas. Estas facies están finamente laminadas y poseen venas de cuarzo de tamaño muy fino.	
Facies de areniscas volcánicas / toba y pizarras hematíticas y cloríticas	Areniscas volcánicas/toba en alternancia con pizarras con alteración hematítica y clorítica. Las areniscas volcánicas están compuestas por fragmentos de cristales de feldespato.	₩ (90'30-90'80) €
Facies de pizarras negras	Pizarras negras con venas de cuarzo. En ocasiones se observan pequeñas venas de pirita diseminada.	1 340 1 340 344
Facies de areniscas volcánicas/toba y tufitas	Areniscas volcánicas/toba en alternancia con niveles de tufitas compuestas por fragmentos de cristales de feldespato y fragmentos líticos. Estas facies están estratificadas y poseen granuloclasificación inversa con los fragmentos más gruesos hacia la parte superior del sondeo.	(99140 - 99140)
Facies coherentes riolíticas	Riolitas compuesta por fenocristales de cuarzo y feldespato, constituyendo una textura porfídica. Estas facies presentan una fracturación perlítica y poseen venas de cuarzo y vacuolas en algunos sectores, constituyendo una textura amigdaloide.	133 134 134 1284 1284
Sulfuros masivos	Mineralización de tipo Stockwork, caracterizado por venas y vetillas de pirita distribuidos de forma irregular, rellenando fracturas en la roca huésped.	
Facies coherentes básicas	Rocas básicas compuesta por cristales de piroxeno y plagioclasa de tamaño inferior a <1mm, constituyendo una textura afanítica. Estas facies están finamente laminadas y poseen venas de cuarzo. Presentan una alteración silicea+clorítica.	1 323 329 + 7271/0-3277+0
Facies de pizarras s.l	Pizarras grises en alternancia con niveles de cuarzo.	

## Principales tipos de facies en el sondeo TRA-10 vista en láminas delgadas

LÁMINAS DELGADAS	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Lámina TRA- 10_24	Brecha polimictica, se observan principalmente dos tipos de fragmentos de mayor tamaño: 1) roca volcánica con textura felsitica constituida por microcristales de cuarzo y 2) roca volcánica de composición básica constituida por microlitos de plagioclasa. Adicionalmente, se observan vesículas que han sido rellenadas por clorita y carbonato. La matriz de esta brecha está compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa, los cuáles muestran alteración por carbonatos	a sooper a sooper
Lámina TRA- 10_24b	Brecha polimictica, se observan principalmente tres fragmentos. Los fragmentos 1 y 2, corresponden a una pizarra, caracterizada por su foliación y textura de grano fino y 3) roca volcánica de composición básica constituida por microlitos de plagioclasa. Adicionalmente, se observan vesículas que han sido rellenas por clorita. La matriz de esta brecha está compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa y clorita.	Sooper Store Store Store Store
Lámina TRA- 10_26	Brecha polimíctica, se observan principalmente tres fragmentos. Los fragmentos 1 y 2 corresponden a una pizarra. El fragmento 3 corresponde a una roca volcánicas félsica de tamaño de grano fino. La matriz de esta brecha está compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa y alteración clorítica.	
Lámina TRA- 10_26b	Arenisca volcánica/toba con tamaño de grano más fino constituida por fragmentos de cuarzo y fragmentos de dacita con cristales de cuarzo y plagioclasa. Esta arenisca muestra una alteración sericítica con foliación muy marcada y deformada, caracterizada por la presencia de sombras de presión. Asimismo, pueden observarse pequeños fragmentos de pirita alojados en fragmentos de mayor tamaño.	

LÁMINAS DELGADAS	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Lámina TRA- 10_30	Arenisca volcánica constituida por fragmentos de cuarzo y plagioclasa. Muestra alteración sericítica.	
Lámina TRA- 10_124	Roca volcánica de composición básica constituida por microlitos de plagioclasa. Asimismo, en esta roca se observan minerales ferromagnesianos (piroxenos) con alteración clorítica.	
Lámina TRA- 10_133	Roca volcánica de composición félsica (riolita), constituida por cristales de cuarzo y alteración sericítica. Esta roca muestra fracturación perlitica.	
Lámina TRA- 10_137	Roca volcánica de composición félsica (riolita), constituída por cristales de cuarzo. Esta roca muestra fracturación perlítica, como consecuencia de la hidratación de un vidrio volcánico	

LÁMINAS DELGADAS	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Lámina TRA- 10_143	Riolita con fracturación perlítica, como consecuencia de la hidratación de un vidrio volcánico. Muestra una matriz muy homogénea	
Lámina TRA- 10_163	Arenisca volcánica de composición félsica (toba ácida), constituida por fragmentos dacíticos, cuarzo y plagioclasa con alteración sericitica. También se observan fragmentos de cuarzo rotos como consecuencia de la deformación.	
Lámina TRA- 10_248	Arenisca volcánica de composición félsica (toba ácida), constituida por fragmentos de cuarzo y plagioclasa y alteración sericitica. Muestra un tamaño de grano más fino que la anterior. Asimismo, en esta roca se observan sombras de presión en cristales de pirita, como producto de la deformación	
Lámina TRA- 10_309	Roca volcánica de composición básica caracterizada por una textura diabásica conformada principalmente por microlitos de plagioclasa alterada. En en esta roca se observan cristales de cuarzos, originados como producto de un proceso de alteración.	

LÁMINAS DELGADAS	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Lámina TRA- 10_319	Roca volcánica de composición básica, constituida principalmente por microlitos de plagioclasa que presentan una intensa alteración a carbonatos. En esta roca no se observan microcristales de cuarzos.	







#### Correlacciones elementos traza Método ME-MS61 con pXRF









							5 20 35	-	0 80000		
40000 80000		<b>มากัญสา</b> นไหน้			<b>1</b> 0 0 0 000≣ #31				and the set of the set of the	s	
									SpXRF	-	40000 80000
0 5 10 20 30		<b>.</b>		<b>*</b> ***	•	100 T	• 4	W	1	÷	
		2 ****					WpXRF	0.40	0.41		5 10 20 30
0 10 30 50					<b>\$</b>	18	0.34	1	0.56		
		• •	i s	Ż	LapXRF	0.55	127		0.54		0 500 1000 1500
0 20 60 100 140				Ce	0.56	0.98	0.36	1	0.58	4.2	
		• •	CepXRF	044	0.39	0.43	a	(A.,	0.53	-	0 500 1000 1500 200
0 50 100 150 200	· ·	Sn	0.46	0.45	0.39	0,43	0.59		0.67	:	0
	SnpXRF	0.77	0.53	0.52	0.51	0.50	0.53		0.88		0 100 200 300 400
		0 100		0 60 140	را ۱	0 30 60		0 15 30		0 60000	



## Correlaciones elementos mayores y menores Método MAT1 con pXRF

#### Correlaciones elementos traza Método MAT1 con pXRF





37



#### Correlaciones elementos mayores y menores Método MAT3 con pXRF





#### Correlaciones elementos traza Método MAT3 con pXRF







43



## Correlaciones con el Azufre pXRF

	0 60000		50 200 350		0 50 150		0 10000		
0 10000		# # # <sup>8</sup>	a a a a a a a a a a a a a a a a a a a					Znp>	
30000 50000		⊞ ∎	# #	# #	⊞ ⊞ ⊞	⊞ ⊞ ⊞	# #	(RF	
							CupXRF	0.98	0 5000 10000 20000
0 5000 15000				2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2		AspXRF	0.90	0.37	
		83 88 2008 8 2009 2009 21 21 21 20 21 20 21			NIpXRF	0.29	0.35	2	0 50 100 150
0 200 400 600 800 1000				CopXRF	E.	0.72	0.77	0.44	
			CrpXRF	8	0.33	,		1	
0 5000 10000 15000		PbpXRF	F.	0.42	4	031	023	0.92	
N.	SpXRF	0.56	i i	0.90	0.22	0.79	0.84	0.58	
								0 20000 500	1 000