



# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Tesis

*Caracterización petrológica y origen de los yacimientos de perlita en Babidanchi, NE de Sonora, México: Implicaciones geoquímicas e interdependencia de variables en su expansión.*



## SINODALES

**PRESIDENTE** Dr. Francisco Abraham Paz Moreno

**SECRETARIO** M.C. Juan Ramón González Sandoval

**VOCAL** Dr. Jesús Roberto Vidal Solano

**VOCAL** M.C. Héctor Hinojosa García

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

*A mi madre y al recuerdo de mi abuela.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos con quienes he convivido estos últimos años, han sido de mucho aprendizaje y gente nueva. Gracias siempre primero a mi madre por apoyarme incondicionalmente en todo momento, sin ella no sería nada.

Muchas gracias al Dr. Jesús Roberto Vidal Solano por hacerme participe en el depósito de perlita de esta investigación y por la ayuda que me brindó, también por invitarme a participar en “la rocateca”, eso me ayudó mucho a desenvolverme en lo que estaba continuamente aprendiendo, principalmente con Mariana, Sofía, Iram y Abraham, gracias también a ellos, a Rodolfo, Alejandra, Luis, Javier y a todos los demás rocatecos.

Muchas gracias al Dr. Francisco Abraham Paz Moreno por sus correcciones y pláticas para la elaboración de esta tesis, también por sus cátedras en el pinacate y salidas a campo.

Muchas gracias al M.C. Juan Ramón González Sandoval por corregirme, por sus comentarios y por hacerme reír tanto, eso vale oro.

Muchas gracias al M.C. Héctor Hinojosa García por sus correcciones y por lo que me instruyó en el campo que se colectaron algunas de las muestras de este trabajo.

Muchas gracias al M.C. Abraham Mendoza por su ayuda en el capítulo de difracción, por explicarme, por hacer correcciones, y como dato relevante, por enseñarme una palabra muy curiosa y poderosa, “resiliencia”.

Muy especialmente gracias al Dr. Juan Carlos García y Barragán por su elocuencia al detallar un tema cuando lo imparte.

También muchas gracias al Dr. Ricardo Amaya Martínez por su orientación, al igual que al Dr. Francisco Javier Grijalva.

Gracias al M.C. Jesús M. Rascón Barrios por sus asesorías en matemáticas, fueron indispensables para la culminación de esta investigación.

Siempre voy a recordar estos años, hice muchos amigos, espero que a todos les vaya excelente, que tengan mucho éxito todos mis compañeros, y que siempre nos sigamos encontrando causal y casualmente.

Agradezco a todos mis profesores, también a aquellos con quienes no tuve la oportunidad de llevar clase, me ayudaron mucho, les aprendí mucho a todos. Gracias por compartir su conocimiento.

También gracias al personal del departamento, tal vez cuando menos lo esperen andaré por ahí. 😊

Agradezco a todos aquellos que comparten conmigo este viaje llamado vida.

# ÍNDICE

## **INTRODUCCIÓN, 1**

- Localización, 3
- Vías de acceso, 4
- Objetivo general, 4
- Objetivos específicos, 4
- Justificación del estudio, 5
- Metodología, 5

## **GEOLOGÍA GENERAL, 7**

- Fisiografía y geomorfología, 7

## **GEOLOGÍA REGIONAL, 9**

## **GEOLOGÍA LOCAL, 9**

- Descripciones litológicas, 10

## **FALLAS ESTRUCTURALES, 16**

## **PETROGRAFÍA, 19**

- Las facies con obsidiana, 20
- Cambios texturales, 21
- Litofacies de brecha envolvente, 23
- Perlitas con facies fluidales, 24
- Grado de perlitización, 29
- Grava de perlita, 35

## **DIFRACCIÓN DE RAYOS X, 38**

## **GEOQUÍMICA, 40**

- Características geoquímicas de los magmas formadores, 40
- Elementos traza, 43
- Tierras raras, 44

Características químicas de la perlita, 44

Elementos mayores, 45

Diferenciación del magnesio, 47

Elementos mayores de la perlita normalizados a obsidiana, 48

Elementos traza y tierras raras, 52

Elementos traza y tierras raras normalizadas a obsidiana, 54

Índice de alteración, 60

## **EXPANSIÓN, 62**

Aplicaciones, 65

Densidad expandida y pérdidas por calcinación, 66

Rendimiento al horno, 68

Relación rendimiento al horno y pérdidas por ignición, 70

Interdependencia de variables, 72

Índice de expansión, 72

Cálculos ideales mediante funciones interdependientes, 74

## **DISCUSION, 79**

## **CONCLUSION, 81**

Propuestas, 84

## **BIBLIOGRAFÍA, 85**

## **ANEXOS, 89**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Estado de Sonora y vialidades principales, 4

Figura 2. Mapa fisiográfico del noroeste de la República Mexicana y mapa de relieve de la región, 7

Figura 3. Mapa geomorfológico del área de estudio, 8

Figura 4. Columna estratigráfica esquemática, 11

Figura 5. Mapa de relieve: fallas estructurales medidas en campo, 16

Figura 6. Diagramas de planos de fallas y roseta, y polos de planos de fallas, 17

Figura 7. Muestra PB16-12, 20

Figura 8. Muestra PB16-13, 21

Figura 9. Muestra PB16-05, 22

Figura 5. Muestra PB16-25, 23

Figura 6. Muestra PB16-17, 24

Figura 7. Muestra PB16-22, 26

Figura 8. Muestra PB16-29A, 27

Figura 9. Muestra PB16-C1, 28

Figura 10. Muestra PB16-C6B2, 28

Figura 11. Muestra PB16-01, 30

Figura 12. Muestra PB16-27, 31

Figura 13. Muestra PB16-C6B, 31

Figura 14. Muestra PB16-15, 32

Figura 15. Muestra PB16-18, 33

Figura 16. Muestra PB16-C6A, 33

Figura 17. Muestra PB16-20, 34

Figura 18. Muestra PB16-19, 35

Figura 24. Muestra PB16-28A, 36

Figura 195. Muestra PB16-28B, 37

Figura 26. Difractograma de la muestra PB16-19 CT, 39

Figura 27. Difractograma de la muestra PB16-29A CT, 39

Figura 28. Diagrama de clasificación para rocas volcánicas TAS (Total Alkalies vs Silica) y diagrama de variación de series magmáticas, 41

Figura 29. Diagrama discriminador de la serie toleítica y calco-alcalina, 42

Figura 30. Simbología geoquímica de diagramas multi-elementos, 43

Figura 31. Diagrama multi-elementos normalizado al manto primitivo, 43

Figura 32. Diagrama multi-elementos de tierras raras normalizadas a condrita, 44

Figura 33. Diagramas binarios entre LOI contra Elementos mayores, 46

Figura 34. Relación de pérdidas por calcinación contra diferenciación del magnesio y tendencia de diferenciación de perlitas, 47

Figura 35. Diagrama multi-elementos normalizados a obsidiana, 50

Figura 36. Multi-elementos de las muestras pérdidas por ignición con 4.3% y expansiones a densidades de  $\sim 21.5 \text{ kg/m}^3$ , 51

Figura 37. Muestras con valores por perdidas por ignición entre el 5.3 y 6%

y expansiones a densidades de 25-30 kg/m<sup>3</sup>, 51

Figura 38. muestras con expansiones entre 32-45 kg/m<sup>3</sup> y LOI entre 3.98 y 7.22%, 51

Figura 39. Diagramas binarios representando la relación LOI contra Elementos traza, 53

Figura 40. Diagrama multi-elementos normalizado con los valores de la obsidiana, 56

Figura 41. muestras con densidades expandidas de ~21.5 kg/m<sup>3</sup> y LOI de 4.3%, 57

Figura 42. muestras con valores por perdidas por ignición entre el 5.3 y 6% y expansiones a densidades de 25 a 30 kg/m<sup>3</sup>, 58

Figura 43. Muestras con expansiones entre 32-45 kg/m<sup>3</sup> y LOI entre 3.98-7.22%, 59

Figura 44. Relación de índice de alteración contra perdidas por ignición, 61

Figura 45. Comparación de los valores de expansión de la perlita Babidanchi que están por encima de la referencia de la mina Socorro en el porcentaje retenido en la malla 50 (297 micrómetros), 63

Figura 46. Comparación de los valores de expansión de la perlita Babidanchi que se encuentran con menor porcentaje de retenidos que la referencia de la mina Socorro en la malla 50 (297 micrómetros), 64

Figura 47. Proporción utilizable por aplicaciones, 65 Fotografía

Figura 48. Relación de la densidad expandida contra pérdidas por calcinación, 67

Figura 49. Relación del rendimiento al horno contra densidad expandida, 69

Figura 50. Relación del rendimiento al horno contra pérdidas por calcinación, 71

Figura 51. Paramétrica en función de LOI, 72

Figura 52. Tendencia potencial en función de LOI (%) y la densidad (kg/m<sup>3</sup>), 74

Figura 53. Tendencia logarítmica en función de la densidad (kg/m<sup>3</sup>) y el rendimiento del horno (%), 75

Figura 54. Tendencia exponencial en función del rendimiento al horno (%) y el LOI (%), 76

Figura 55. Tendencia exponencial en función de la densidad expandida (kg/m<sup>3</sup>) y el LOI (%), 77

Figura 56. Tendencia logarítmica en función de LOI (%) y el rendimiento al horno (%), 77

Figura 57. Tendencia de polinomio de tercer grado del rendimiento al horno en función de LOI, 78

Figura 58. Mapa geológico de Babidanchi, 90

Figura 59. Secciones geológicas de Babidanchi, 91

Figura 60. Mapa del depósito La Bendición con las muestras utilizadas en las relaciones de propiedades de expansión contra geoquímica, 92

Figura 61. Mapa del depósito Selene con las muestras utilizadas en las

relaciones de propiedades de expansión contra geoquímica, 93

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Muestras analizadas bajo el microscopio petrográfico, 19

Tabla 2. Índice de expansión, 73

Tabla 3. Muestras de las litologías observadas en los márgenes del yacimiento perlítico del rancho Babidanchi, 89

Tabla 4. Datos del certificado de expansión, 94

Tabla 5. Datos geoquímicos del certificado de ALS minerals, 96

Tabla 6. Datos de las perlitas normalizadas a los valores de la obsidiana, 126-129

## **ESQUEMAS**

Esquema 1. Metodología empleada para la investigación y productos, 6

## **FOTOGRAFÍAS DE MUESTRAS DE MANO, TESTIGO Y SECCIÓN DELGADA.**

Fotografía 1. Muestra de mano y sección delgada PB16-12, 97

Fotografía 2. Muestra de mano y sección delgada PB16-13, 97

Fotografía 3. Muestra de mano y sección delgada PB16-05, 98

Fotografía 4. Muestra de mano y sección delgada PB16-17, 99

Fotografía 5. Muestra de mano y sección delgada PB16-22, 100

Fotografía 6. Muestra de mano y sección delgada PB16-29A, 101

Fotografía 7. Muestra de mano y sección delgada PB16-C1, 102

Fotografía 8. Muestra de mano y sección delgada PB16-C6B2, 103

Fotografía 9. Muestra de mano y sección delgada PB16-01, 104

Fotografía 10. Muestra de mano y sección delgada PB16-27, 105

Fotografía 11. Muestra de mano y sección delgada PB16-C6B, 106

Fotografía 12. Muestra de mano y sección delgada PB16-15, 107

Fotografía 13. Muestra de mano y sección delgada PB16-18, 108

Fotografía 14. Muestra de mano y sección delgada PB16-C6A, 109

Fotografía 15. Muestra de mano y sección delgada PB16-20, 110

Fotografía 16. Muestra de mano y sección delgada PB16-19, 111

Fotografía 17. Muestra de mano y sección delgada PB16-28A, 112

Fotografía 18. Muestra de mano y sección delgada PB16-28B, 113

## **FOTOGRAFÍAS PANORÁMICAS**

Fotografía 19. Perlita pulida en el arroyo Babidanchi, 114

Fotografía 20. Perlita a los márgenes del arroyo Babidanchi, 115

Fotografía 21. Perlita intemperizada, y perlita color marrón, 116

22. Marekanitas u obsidiana donde no fue efectiva la perlitización, 117

Fotografía 23. Arroyo Babidanchi y perlita a sus márgenes, 118

Fotografía 34. Yacimiento de perlita "La Bendición", 119

Fotografía 45. Base del yacimiento de perlita "La Bendición", 120

Fotografía 56. Yacimiento de perlita "Selene", 121

Fotografía 67. Yacimiento de perlita "Selene", y gravilla de perlita, 122

Fotografía 78. Gravilla de perlita en el yacimiento "Selene" en zona de falla, 123

Fotografía 89. Gravilla de perlita del yacimiento "Selene", 124

Fotografía 30, Gravilla de perlita del yacimiento "Selene", en zona de falla, 125

## Resumen

La presente investigación se basó en el estudio de la perlita Babidanchi con interés económico teniendo como finalidad su explotación, para esto se integró el conocimiento geológico por medio de distintas herramientas; como cartografía, petrología, geoquímica, DRX, y la relación con su expansión. Los resultados muestran que el depósito de perlita se encuentra confinado entre una secuencia volcánica bimodal del Mioceno, que ha sido depositada sobre una ignimbrita masiva del Oligoceno relacionada al volcanismo de la Sierra Madre Occidental. La caracterización petrográfica de distintas facies del depósito reconoció una matriz vítrea con fractura concoide, inclusiones fluidas, y laminaciones de flujo con triquitas de magnetita y/o microlitos, que generalmente se presentan de forma recta y paralela, aunque en ocasiones con distintos grados de contorsión, y que además en algunas litofacies están compuestas por criptocristales de fayalita. Las distintas litofacies del yacimiento varían en el grado de su perlitización o fractura concoide, frecuentemente en esta fractura se observa una mayor población de inclusiones fluidas, y en pocos casos que estas son rellenas por cuarzo y zeolitas (Clinoptinolita). Otras características físicas variables en las facies de la perlita es el cambio de color, además de un cambio en la textura, a una tobácea, y en niveles hacia los bordes del yacimiento ocurre una facies brechoide con fragmentos perlíticos que comparten las mismas características. Los análisis de difracción de rayos X permitieron identificar variedades minerales del grupo de Sílice (Cristobalita) que cristalizan a altas temperaturas, y corroboraron la presencia de fayalita y magnetita, mostrando que los magmas son de más alta temperatura, que los de la riolitas comunes. Geoquímicamente se trata de una riolita de la serie calci-alcalina con alto contenido en potasio y aluminio, y pérdidas por calcinación entre 4 y 6% (LOI, *loss of ignition*). Se propone que estas pérdidas por calcinación son asociadas a una hidratación secundaria, que hace que este material logre expandir al someterlo a temperaturas entre 600 y 1,000°C. De acuerdo con las pruebas de expansión de las muestras, se plantea una *interdependencia* a la variable LOI con

el porcentaje de expansión y el rendimiento del horno, así como la consideración sobre la presencia de núcleos de obsidiana, también llamados *marekanitas*, que representan a la roca original, sin la hidratación secundaria, como un relicto del emplazamiento de la lava, proceso característico en la formación de yacimientos perlíticos. En la construcción de diagramas representativos del proceso de expansión se usaron valores de agua obtenidos mediante pruebas por LOI de las perlitas y la obsidiana, comparados contra resultados del proceso de expansión, considerándole a este proceso como prueba física. Los distintos diagramas generaron funciones auxiliares dependientes de LOI, con lo que se construyó un gráfico paramétrico que considera las distintas variables implícitas en la expansión, con esto se construyó un método matemático que permite evaluar y pronosticar el proceso de expansión, donde se observa cómo en algunos casos las muestras presentan densidades mayores debido a que sobrepasaron el punto de fusión, otras que no llegaron a su densidad mínima por no haber tenido rendimientos óptimos al horno, y las de densidades menores, que representan un proceso de expansión considerablemente óptimo. Además, al normalizar los valores de los elementos químicos de las muestras de perlita contra los valores de la obsidiana, se observan cambios en la concentración de algunos elementos derivados del proceso de perlitización.

## INTRODUCCIÓN

La perlita es un vidrio volcánico que puede expandir a baja densidad cuando se le somete a altas temperaturas (*Barker et al, 1987*). En el procesamiento industrial, la perlita cruda se extrae del yacimiento, es triturada, se seca, y se muele y tamiza para ser expandida (*United States Environmental Protection Agency, 1985*).

Este vidrio es formado a partir de la hidratación de la obsidiana o vitrófido después de su emplazamiento. El contenido de agua en la obsidiana y vitrófido suele ser del orden de 1%, mientras que en la perlita está entre el 2 y 5%. Se considera que el agua presente en la obsidiana deriva del magma originario, mientras que el agua de la perlita es resultado de un episodio posterior a su emplazamiento (*Ross y Smith, 1955*). Esto se determinó a partir de concentraciones de deuterio en perlitas que estaban relacionadas con aguas meteóricas, a diferencia de las obsidianas encerradas en la perlita que no tenían estas concentraciones de deuterio (*Friedman y Smith, 1958*).

Para la formación de un vidrio volcánico es indispensable un enfriamiento rápido, pero la composición química del magma tiene una gran influencia, ya que controla la viscosidad, y limita la cristalización. Al enfriarse rápidamente un magma, este aumenta su viscosidad y las tasas de cristalización son insignificantes, por lo que se forma un vidrio. Si el enfriamiento posterior a la solidificación también es rápido y de temperaturas menores, las tensiones de estas bajas temperaturas provocan que el vidrio se rompa, lo que forma una estructura o textura perlítica (*Marshall, 1961*).

La estructura perlítica se puede desarrollar en cualquier vidrio hidratado, como lavas vítreas, intrusiones superficiales, y depósitos piroclásticos densamente soldados. Esta textura perlítica se forma más comúnmente en vidrios silícicos hidratados, aunque también se puede llegar a desarrollar a partir de lavas de composición intermedia o máfica (*McPhie et al, 1993*). Estudios detallados de rocas volcánicas vítreas han proporcionado información sobre la identidad mineral, propiedades físicas e historia genética de diminutos cristales conocidos como *microlitos* y *triquitas* (*Ross, 1962*), a estos se les considera como “no

expandibles” que representan impurezas, por lo que esta fracción debe ser determinada ([Barker et al, 1987](#)).

En [1983 González-Sandoval](#) menciona algunas de las especificaciones de la ASTM, en las que la densidad de la perlita expandida tiene una importancia según la aplicación que se le dé, y del parámetro del valor de PH. Además, presenta la distribución de algunos yacimientos de perlita en el estado de Sonora.

En recientes investigaciones en el área de estudio, Babidanchi en el estado de Sonora, [Hinojosa-García \(2016\)](#) y [Vidal-Solano et al. \(2014\)](#) presentan resultados que indican, que las propiedades físicas y químicas de la perlita proveniente de diferentes yacimientos en Sonora, no mostraron diferencias significativas entre sí. En la mayoría de los análisis de las muestras del sitio, la expansión de las partículas se originó en el intervalo de 750 a 900°C, lo que originó que se liberara el agua contenida en su interior, al mismo tiempo que aumentó su volumen. La clasificación de las perlitas del estado de Sonora corresponde a riolitas del dominio de la serie calci-acalina con valores bajos en la relación Hierro/Magnesio, y altos valores en Potasio. Los elementos traza revelan enriquecimiento de los elementos incompatibles móviles y un empobrecimiento de los inmóviles con anomalías características de magmas de arco volcánico ([Vidal-Solano et al., 2014](#)). Al material producto a ese proceso de expansión se le conoce como perlita expandida, y adquiere propiedades como; baja conductividad térmica y acústica, alto índice de dureza, a pesar de su baja densidad, resistencia al fuego, etc. Las perlitas, en términos químicos, son silicoaluminatos de sodio y potasio hidratados con bajos contenidos de óxidos de hierro, titanio, calcio, magnesio, etc. La roca es amorfa metaestable, y químicamente inerte. Como menciona el autor, “A pesar de la versatilidad de la perlita para las aplicaciones descritas, su uso no se ha extendido en México. Entre otros factores, esto puede deberse a la falta de ubicación completa de los yacimientos y a la carencia de información acerca de sus propiedades físicas, químicas y térmicas.” ([Hinojosa-García, 2016](#)).

Una investigación más reciente sobre la expansión de la perlita en Babidanchi, hizo un análisis considerando las variaciones granulométricas, la temperatura y el tiempo ([Alonso, 2018](#)), planteando en una de sus conclusiones que la rapidez del calentamiento de

las partículas tiene un roll importante para su expansión, y determina que ocurre después del equilibrio térmico de las partículas con el gas circundante.

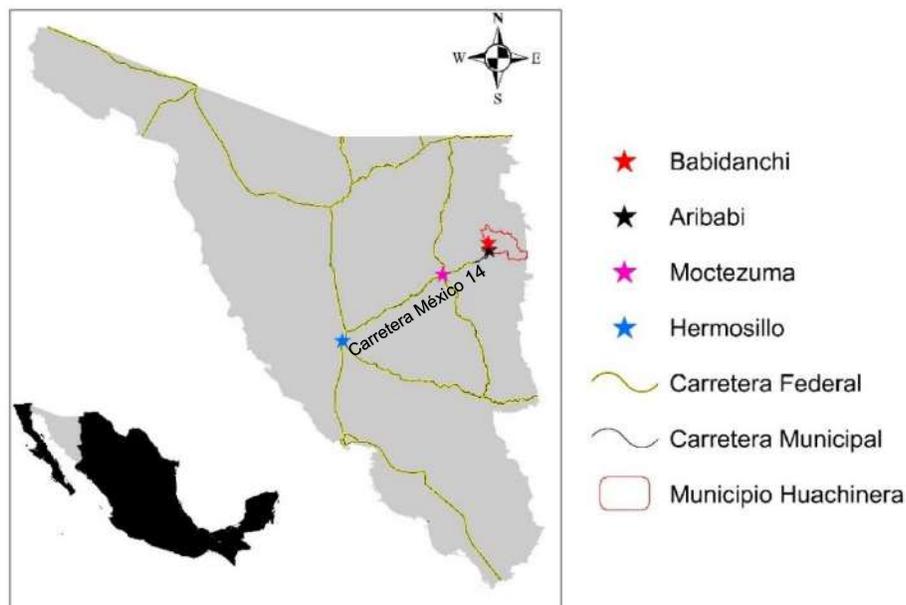
De acuerdo con el *Instituto de la perlita (Perlite institute, 2009)*, una de las aplicaciones de la perlita expandida es en filtros de aire, y de distintos tipos de líquidos; como vinos, cerveza, jugos, aceites, biodiésel, distintos químicos, agua potable, piscinas, etc. Debido a su gran absorción es utilizada en distintas etapas en horticultura e hidroponía, ya que permite el alojamiento de agua entre los intersticios de sus partículas. Esta misma absorción le permite servir de transporte a diferentes agroquímicos, pesticidas y herbicidas, portador de abonos, absorción y limpieza de aceites o agentes contaminantes, etc. Suele ser usada como relleno en embalaje para envíos, pinturas, plásticos, calafateo, etc. En el sector de gases industriales, es común usarla en contenedores criogénicos estáticos y de transporte, ya que requieren estar a muy bajas temperaturas, en cambio en el sector industrial con necesidades de alta temperatura se utiliza en hornos, tapado de crisol, etc. Debido a sus propiedades contra el fuego, abrasivas, y acústicas, la podemos encontrar dentro del uso cotidiano en materiales; aislantes contra incendios en cajas fuertes, puertas, revestimiento de chimeneas, jabones, pulimentos, compuestos dentales, piedras limpiadoras, morteros, yesos, muros de absorción de sonidos, etc. Los usos de la perlita expandida están relacionados al tamaño de sus partículas, estas granulometrías se encuentran en el orden de 10 mm a menores, por ejemplo; en horticultura son de tamaños que van de 0.59 a 10 mm, en mampostería y concretos de 0.250 a 2.83 mm, en criogenia de 0.125 a 1 mm, como retenedor de agua por finos de 0.088 a 1 mm, como filtros de aire en 0.25 a 0.59 mm, y como microesferas de 0.010 a 0.35 mm.

## **LOCALIZACIÓN**

El área de estudio se encuentra en el noreste del estado de Sonora, y al límite oeste del municipio de Huachinera, entre las coordenadas 685,520.15 m E, 3,336,362.25 m N y 683,043.24 m E, 3,335,279.34 m N, del sistema coordinado UTM en la Región 12 (*Figura 1*). Los datos cartográficos, representación del relieve, y rasgos hidrográficos, se muestran la carta 1: 50 000 de Villa Hidalgo (*H12-B86; INEGI, 2005*) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

## VÍAS DE ACCESO

Para llegar al rancho Babidanchi desde Hermosillo, se toma la carretera México 14 con rumbo a Huachinera, se pasa por los poblados de Ures a 79 kilómetros, Mazocahui a 113 kilómetros y, Moctezuma a 180 kilómetros, al llegar al poblado de Aribabi, después de haber recorrido 270 kilómetros, se toma un camino de terracería con rumbo norte aproximadamente 9 kilómetros más para llegar al rancho Babidanchi (*Figura 1*). Cabe mencionar que todas las distancias a los poblados son tomadas desde Hermosillo.



*Figura 1. Mapa del estado de Sonora y vialidades principales y ubicación del área de estudio.*

## OBJETIVO GENERAL

Caracterizar petrológicamente los yacimientos de perlita en el rancho Babidanchi y determinar su relación con la química y expansión.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las fases mineralógicas presentes en la perlita con ayuda del método difracción de rayos X.
- Caracterizar petrográficamente a la perlita.

- Determinar la composición química en elementos mayores y traza de la perlita.
- Caracterizar y clasificar geoquímicamente el magma que produjo la perlita.
- Determinar la expansión de la perlita.
- Establecer la relación que guardan las características petrológicas de la perlita con su química, expansión, rendimiento del horno, y partículas no expandibles.

## **JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

Se busca realizar un estudio que integre el conocimiento geológico, por medio de la cartografía y la petrología, a la geología económica de los yacimientos minerales no-metálicos, proponiendo como una alternativa la explotación de la perlita en Sonora.

## **METODOLOGÍA**

Las etapas contempladas en el presente estudio son resumidas y ordenadas en el Esquema 1. Como una primera etapa se planificó el trabajo de campo a realizar. Como material de apoyo se usaron imágenes satelitales del programa SAS Planet y Google Earth, y modelos de elevación del área, que fueron obtenidos por medio de las curvas de nivel de la carta topográfica Villa Hidalgo ([H12-B86](#); [INEGI, 2005](#)), provista por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, además de datos en línea del software Global Mapper. El levantamiento de datos y muestreo se realizó por medio de caminamientos. El muestreo fue de tipo sistemático en distintos niveles de los cuerpos perlíticos donde se observaron cambios geomorfológicos, litológicos y texturales. Para la toma de muestras fue necesario recolectar un volumen necesario para pruebas de expansión, sección delgada, geoquímica, difracción de rayos X, por lo que se tomaron aproximadamente 20 kilos por muestra, considerando duplicados.

Una segunda etapa consistió en la preparación de las muestras: a) para la geoquímica se trituraron en tamaño de un par de centímetros, y se llenaron bolsas de aproximadamente 3 kilogramos; b) para la elaboración de láminas delgadas se tomó en cuenta la dirección de las laminaciones fluidales generadas por la orientación de los minerales opacos, haciendo el corte de manera paralela a la dirección de flujo, esto con la finalidad de apreciar los ejes mayores en las partículas de dichas laminaciones, además se

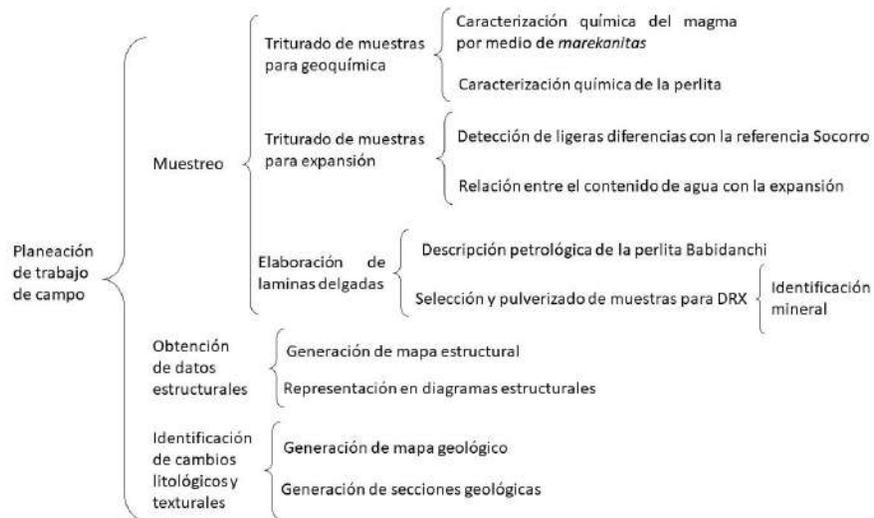
consideró el desarrollo y los cambios en su textura perlítica, y la variación mineral; c) se trituraron 10 kg por muestra para pruebas de expansión.

En una tercera etapa se analizaron petrográficamente a las secciones delgadas obtenidas, identificando los distintos grados de desarrollo de la textura perlítica y seleccionando a muestras con minerales que no se lograron identificar en él microscopio para difracción de rayos X.

En una cuarta etapa se prepararon muestras para difracción de rayos X, pulverizando las laminaciones de flujo de la roca perlítica y pasando el polvo bajo la maya #200.

La preparación y pulverización de las muestras para los análisis geoquímicos fueron preparados en ALS-Chemex.

Una quinta etapa consistió en el trabajo de gabinete, en el que se generó una base de datos con lo observado en campo, y modelos con vista en planta y en tres dimensiones del área. Esta recopilación incluye afloramientos, contactos, fallas, muestreo, fotografías, actitud de las estructuras, datos de geoquímica, expansión, etc. Es aquí cuando se inició la integración y el análisis de los distintos estudios realizados en la redacción del presente documento.



*Esquema 1. Metodología empleada para la investigación y productos obtenidos.*

## GEOLOGÍA GENERAL

### FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio se encuentra en el límite norte de la provincia de la Sierra Madre Occidental, y en la subprovincia de Sierras y Cañadas del Norte, colinda con la subprovincia de Sierras y Valles del Norte (*Figura 2.1*). Dichas unidades fisiográficas abarcan parte del noroeste central de la República Mexicana y suroeste de los Estados Unidos, y se distinguen por tener sierras y valles paralelos (*Figura 2.2*) con orientaciones preferenciales norte-sur formados por tectonismo distensivo en el Terciario (*Morán, 1984*).

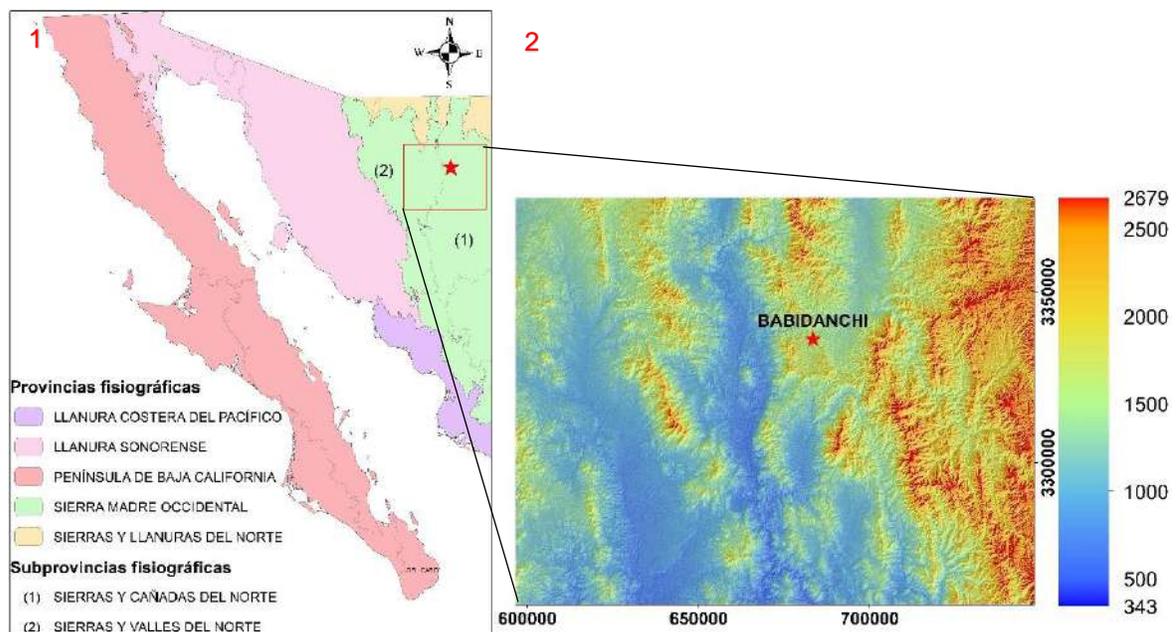


Figura 2. (1) Mapa fisiográfico del noroeste de la República Mexicana: principales provincias y subprovincias cercanas al área de estudio, y (2) mapa de relieve de la región: se observan sierras y valles con orientación norte-sur, ilustrado por una colorimetría con alturas en metros sobre el nivel del mar.

Los cuerpos perlíticos en el área de estudio tienen como característica morfológica (Figura 3) que regularmente desarrollan cañadas de pendientes abruptas, debido a que el material cuenta con propiedades físicas que impiden su rápida erosión. Solo en áreas muy localizadas este material se encuentra triturado y como relleno, lo cual es producto del contacto por un fallamiento.

Subyacente a los cuerpos perlíticos encontramos unidades volcánicas de composición riolítica (en depósitos de ignimbrita) y andesítica, los cuales presentan geoformas con pendientes atenuadas debido a su tipo de depósito volcánico y a su moderada resistencia a la erosión. La característica geomorfológica más notoria de las unidades sobreyacentes a los cuerpos perlíticos, es la presencia de amplias mesas basálticas que coronan a las unidades anteriores. Por último, podemos encontrar lomeríos de pendiente suavizada debido a su origen sedimentario.

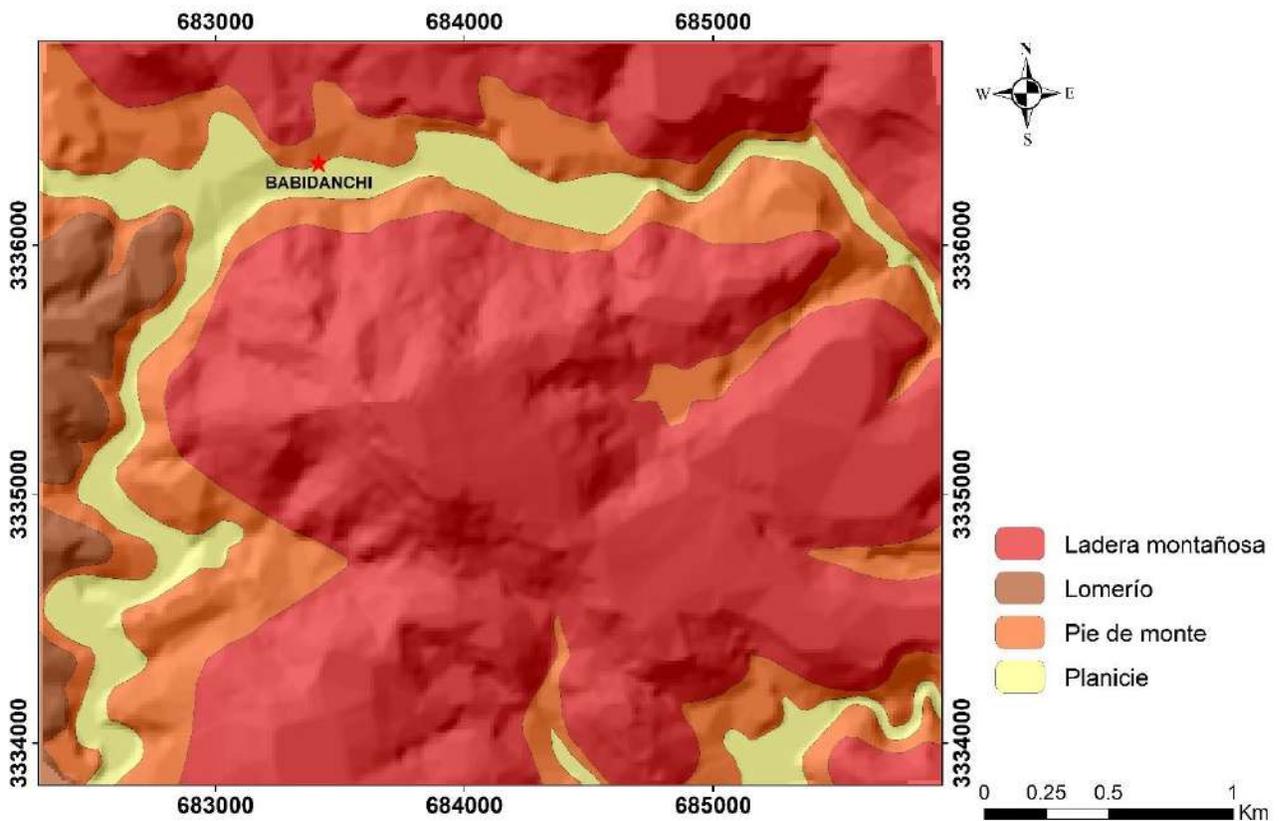


Figura 3. Mapa geomorfológico del área de estudio.

## **GEOLOGÍA REGIONAL**

En términos geológicos, el estado de Sonora es privilegiado, (1) ya que se han identificado algunas de las rocas más antiguas de la República Mexicana, (2) existen rocas y fósiles prácticamente de todas las edades, por lo que se cuenta con la columna estratigráfica más completa de todo el país, y (3) porque se localiza cerca al límite de placas tectónicas ([Roldán, 2011](#)). La morfología del área de Sonora ha sido esculpida por múltiples eventos tectónicos desde el proterozoico. Durante finales del Mesozoico y parte del Cenozoico se generaron grandes masas de rocas plutónicas a distancias profundas de la corteza terrestre, producto de la subducción de la placa Farallón, lo que originó la orogenia Laramide ([Valencia-Moreno, 2007](#)). Este proceso tectónico además produjo distintos conjuntos ígneos, que dio como resultado la gran provincia silícica de la Sierra Madre Occidental ([Ferrari et al, 2005](#)), la cual puede subdividirse en ciclos volcánicos que se emplazaron de manera sucesiva, (1) en la que durante el Oligoceno temprano se compone por andesitas e ignimbritas riolíticas porfíricas, y (2) en el Oligoceno tardío por una secuencia caracterizada por lavas máficas intercaladas con ignimbritas silícicas ([Demant et al, 1989](#)), conocido como vulcanismo bimodal. Durante este mismo contexto de subducción se produjo un régimen extensional conocido como *Basin and Range*, relacionado con el cese progresivo de la subducción del Mioceno Medio al Tardío. Dicha extensión originó un sistema de fallas de deslizamiento lateral dextral, y una morfología de cuencas y sierras alargadas con dirección norte-sur a nornoroeste-sursureste ([Calmus et al, 2011](#)). Debido a este evento de extensión de la corteza y al fallamiento generado, se originaron emplazamientos de magmas máficos y félsicos del vulcanismo bimodal en emanaciones de tipo fisura ([Hinojosa-Prieto et al, 2016](#)).

## **GEOLOGÍA LOCAL**

Una amplia investigación del área ([Hinojosa-Prieto et al, 2016](#)) presenta una petrografía de las litologías de la parte inferior y superior de la secuencia, panoramas de las

estructuras y yacimientos, análisis estructural de fallas y vetas de calcedonia, además de modelos de la evolución volcánica del sitio.

*Almazán Holguín y Trelles Monge, 1986* realizaron un estudio geológico en la región de Babidanchi con la finalidad de cuantificar los depósitos perlíticos con fines de comercialización, en dicho trabajo se presentan los distintos cuerpos litológicos del área, las posibles reservas perlíticas, además de sus características físicas y químicas, y un comparativo con yacimientos en Sonora. Estos autores identificaron y describieron las unidades litológicas del área, que en orden geocronológico son: (1) unidad andesítica, (2) piroclástica, (3) riolítica, (4) basáltica, (5) aglomerática y (6) depósitos cuaternarios.

Los anteriores establecimientos son concordantes con lo observado en campo en la presente investigación, solo que en este trabajo se centra en una petrografía detallada de un mayor número de muestras perlíticas, una diferenciación de las características de la lava y de la perlita, identificación mineralógica por difracción de rayos X, y un análisis de geoquímica y de expansión.

La geología del rancho Babidanchi está constituida en su mayoría por una secuencia de derrames, con intercalación de rocas detríticas, que varían de composición félsica a intermedia, depositados sobre un cuerpo ignimbrítico bien soldado de composición félsica (*Figura 4*).

## **DESCRIPCIONES LITOLÓGICAS**

Con base en las distintas litologías reconocidas en el área de estudio (*Figura 4*), de la base a la cima se observó:

**1.- Unidad Ignimbrítica de Base (UIB)**, la cual se trata de un cuerpo ignimbrítico tobáceo bien soldado, de composición riolítica y porfídico de cuarzo, feldespato alcalino y biotita, el cual fue depositado de forma masiva. En áreas localizadas, esta unidad litológica se presenta como una toba de lapilli ignimbrítica, que en ocasiones presenta fragmentos zeolitizados. Este cuerpo presenta datos estructurales según la regla de la mano derecha (RMD) de 258 a 325 azimutal con un buzamiento de 20 a 24°. De dicha unidad ignimbrítica se desconoce el espesor real, ya que no se logró ver su base, sin embargo, se observó que

cuenta con un espesor de por lo menos 100 metros, esta unidad aflora en la porción noroeste del mapa geológico de Babidanchi (*Figura 58 y 59A*).

**2.- Unidad andesita inferior (UAI)**, la cual se encuentra, sobreyacente a la unidad ignimbrítica, formando un cuerpo andesítico porfídico de olivino y piroxeno, que desarrolla una textura amigdalar en la cima, y que cuenta con al menos 60 metros de espesor. Esta unidad litológica se encuentra en los márgenes del arroyo Babidanchi (*Figura 58 y 59*), presenta un fuerte fracturamiento que, en áreas específicas, se aprecia de manera radial. En su mayoría se observa de coloraciones rojizas de apariencia oxidada, además en los afloramientos superiores del cuerpo se presenta una estratificación, que es denotada por vesículas que fueron acomodadas por el flujo lávico. Esta unidad aflora a la parte central del predio, a los márgenes al norte del cuerpo ignimbrítico, y puede contar con entre 50 y 70 metros de espesor con actitudes cercanas a 300°Az buzando 40°.

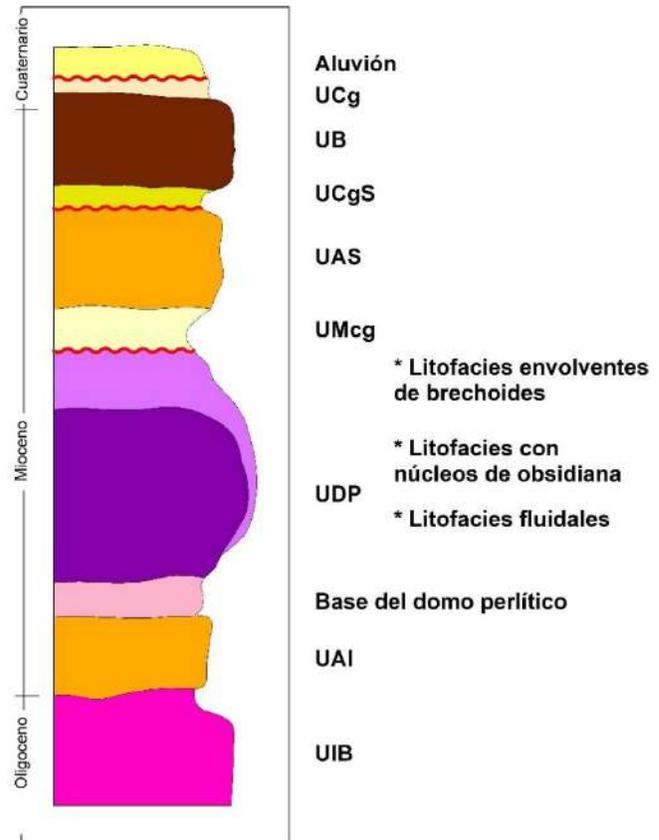


Figura 4. Columna estratigráfica esquemática.

### 3.- Unidad Domos Perl3ticos

**(UDP)**, que ocurre sobre el cuerpo andesítico y que se compone por dos cuerpos perl3ticos (Domo Selene y Domo Babidanchi, *Figura 58 y 59*), que se encuentran diferenciados de manera textural, por su denudaci3n, alteraci3n y deleznablez. En la base de los domos perl3ticos se presentan afloramientos brechoides con abundante alteraci3n a palagonita en colores amarillento p3lido. Estos cuerpos presentan en la base, de forma muy local, una alteraci3n a zeolitas del tipo clinoptinolita. Este dep3sito perl3tico inferior contiene bloques perl3ticos que van de tama3os variables desde decim3tricos hasta m3tricos. En regiones

muy localizadas se presentan textura pumicítica con cristales y vetillas de cuarzo. Es en esas zonas donde se encuentran derrames riolíticos que presentan tonalidades rosáceas y matrices microcristalinas con espesores de entre 5 y 15 metros. Estos cuerpos afloran en la parte central y suroeste del predio Babidanchi, a los márgenes del río Babidanchi, en su parte central, se encuentra el depósito “La Bendición”, y a la margen suroeste del predio se encuentra el depósito “Selene”.

En la parte central de los cuerpos dómicos perlíticos (*Figura 58 y 59*), se observan **litofacies fluidales**, que varían en coloración, tonalidad, intensidad del bandeamiento, paralelismo o contorsión de sus laminaciones, mineralogía del bandeo, grado de desarrollo de la textura perlítica, y frecuencia del vetilleo de cuarzo. En la parte superior de estos cuerpos perlíticos masivos podemos encontrar, de forma reducida, áreas de **litofacies con núcleos de obsidiana**, conocidas como marekanitas, las cuales ocurren en tamaños menores a 10 centímetros, y comparten la mineralogía y laminaciones de los cuerpos que los engloban, mas no la textura perlítica, ya que resultan de sectores donde la perlitización no se efectuó, dejando núcleos de obsidiana que ocurren englobados por perlita. Es debido a que, al no presentar el fracturamiento, el que permite la penetración de la luz, las marekanitas muestran colores oscuros que, tienden al negro. Esta porción superior del cuerpo perlítico cuenta con un espesor menor a los 20 metros de espesor. Los datos estructurales tomados en las facies del domo con laminaciones de flujo, en su mayoría cuentan con orientaciones cercanas al SSE con buzamientos elevados que en ocasiones son verticales.

Cabe señalar que, en un sector localizado de zona de falla de los bloques perlíticos masivos, se puede encontrar un suelo compuesto por material perlítico en pequeños fragmentos gravo arenosos, producto de la meteorización física de la zona de falla que se encuentra al sur de la sección A-A' (*Figura 58 y 59A*), este depósito se encuentra en una zona de falla por contacto ubicado en la parte central del depósito “Selene”. El tamaño de las partículas del material varía desde partículas muy finas de alrededor de milímetros o menores, hasta tamaños que alcanzan los 2 centímetros de diámetro, y el fracturamiento de las mismas ha ocurrido por la textura perlítica, resultando en la formación de una gravilla

bien redondeada. Este depósito perlítico de relleno cuenta con aproximadamente 20 metros de espesor.

A la cima, como una cobertura envolvente brechoide de los domos perlíticos fluidales, podemos encontrar capas de depósitos de bloques y ceniza, compuestas por fragmentos perlíticos en una matriz palagonitizada, dichos fragmentos en ocasiones se encuentran en formas angulosas y silicificados. Los fragmentos o bloques se encuentran en tamaños de entre 15 a 40 centímetros, también se encuentran bloques pumicíticos de colores gris claro a blanco que presentan alteración a sericita y silicificación por calcedonia al este del depósito "La Bendición" (*Figura 48*). Estos fragmentos comparten las laminaciones, texturas, propiedades físicas, y la mineralogía de los domos masivos de perlita. Cabe señalar que los espesores de esta cobertura son muy variables, pero con una tendencia a acuñarse a la distancia, que van de unos pocos metros de espesor, hasta una decena de metros en las áreas laterales contiguas al cuerpo. Esta cobertura aflora generalmente en las partes centrales del depósito "La Bendición", alejado de los márgenes del arroyo.

**4.- Unidad de microconglomerado (UMcg)**, se encuentra sobreyacente en discordancia angular a los cuerpos perlíticos. Se trata de una secuencia detrítica en forma de microconglomerado polimíctico arenoso, que contiene lentes tobáceos y abundantes fragmentos de rocas, cristales, y concreciones esféricas de un centímetro de diámetro. Esta se observa bien estratificada, presenta datos estructurales de 320° de rumbo con 40° echado y aflora con un espesor aproximado de 1 metro. Hay que mencionar que esta unidad solo está ilustrada en la columna stratigráfica, ya que aflora en un área muy reducida en la porción sur del rancho Babidanchi.

**5.- Unidad andesita superior (UAS)**, al norte del mapa geológico (*Figura 58*) de Babidanchi, ocurre sobreyacente a la secuencia detrítica mencionada anteriormente, como una unidad volcánica de composición Basalto-andesítica de aproximadamente 200 metros de espesor. Esta unidad litológica presenta una textura porfídica con fenocristales de olivino, piroxeno y plagioclasa, tiene variaciones de colores grisáceos que en ocasiones tienden al rojizo, además de estar muy fracturada con una fuerte silicificación y oxidación. En esta unidad se observan datos estructurales cercanos a los 290° azimutales de rumbo, con 40°

de echado y en algunos casos, aflorando en lomeríos, se observaron buzamientos verticales, por lo que se piensa que puede deberse al producto de inyecciones volcánicas. Esta unidad andesítica aflora en la parte central sur del predio, sobreyacente a los cuerpos perlíticos.

**6.- Unidad Conglomerado superior (UCgS).** Esta unidad no fue identificada físicamente, se encuentra subyacente a la unidad basáltica mencionada en el siguiente punto, al margen norte del mapa geológico (*Figura 58 y 59*) y cuenta con un espesor cercano o menor a 50 metros. Según reportes del Servicio Geológico Mexicano en esta región, el Oligoceno está representado por emisiones de andesita-toba andesítica y de riolita-toba riolítica, que tiene relaciones discordantes a unidades de andesitas basálticas del Oligoceno y Mioceno, y conglomerados del Mioceno (*Servicio Geológico Mexicano carta geológica H12-B86, 2003*).

**7.- Unidad basáltica (UB).** La última de las unidades volcánicas en el área de estudio es de composición basáltica con espesores menores a los 100 metros, que en la región suele formar mesas ligeramente basculadas. Estas rocas cuentan con una textura porfídica de clinopiroxeno y olivino, que en áreas muy locales este último mineral se encuentra iddingsitizado. Esta estructura presenta datos estructurales con preferencias de rumbo  $270^\circ$  y con  $22^\circ$  de echado. En ocasiones ocurre una estratificación vertical derivada de inyecciones o conductos de alimentación lávica. Tanto la UAS como la UB (*Figura 4*) se encuentran en el cerro adyacente al norte. Estas unidades litológicas fueron descritas en el trabajo de *Almazan Holguín y Trelles Monge (1986)* Esta unidad litológica ocurre con mayor densidad en la parte sur del predio, bordeando y cubriendo los distintos cuerpos, por lo que se encuentra en la parte superior de la secuencia.

Por último, las unidades sedimentarias más jóvenes son definidas en este trabajo como **Conglomerado último** y **Aluvión**, sin embargo, coincide con las definidas por los autores anteriores como “unidad aglomerática” y “depósitos cuaternarios”, por lo que las descripciones son retomadas aquí.

**8.-Conglomerado último (UCg).** Esta unidad consiste en un paquete de aproximadamente 120 metros de espesor que se localiza en la parte oeste y noreste del área de estudio. Sobreyace discordantemente a la unidad basáltica y subyace al Aluvión (*Almazán Holguín y Trelles Monje, 1986*). Se formó a partir de la denudación de los cuerpos litológicos mencionados anteriormente y fue depositada en forma horizontal o ligeramente inclinada en las depresiones orográficas. La naturaleza de los fragmentos que la constituyen varían localmente dependiendo de la cercanía de la fuente de alimentación. Su estructura es ligeramente estratificada y mal clasificada, con fragmentos de roca basáltica, riolítica y piroclástica, que varían en tamaño hasta de 50 centímetros de diámetro. La matriz consiste en calcita y un material tobáceo areno – limoso, producto de la misma erosión. Con base en esto los anteriores autores consideraron que esta unidad es correlacionable con el conglomerado Báucarit (*King, 1939*).

**9.-Aluvion (A).** Estos depósitos son formados a partir de la erosión y transporte fluvial de todas las unidades anteriores. Se localizan en los márgenes de los arroyos Babidanchi y Aguacaliente, con espesores aproximados de 5 metros o menores. Se observaron depósitos de coluvión en los flancos de las partes topográficamente altas del área.

## FALLAS ESTRUCTURALES

Al realizar los distintos caminamientos se identificaron varios tipos de fallas y fracturas, por medio de ellas se obtuvo información para la comprensión de la evolución tectónica y el comportamiento de los distintos cuerpos descritos. A estos fallamientos se les midió datos de actitudes, que fueron tomados en grados azimutales en base a la regla de la mano derecha. Además, se analizaron modelos en tres dimensiones basados en las curvas de nivel proporcionadas por INEGI y el software Global Mapper para ver lineamientos y estructuras relacionadas (*Figura 5*).

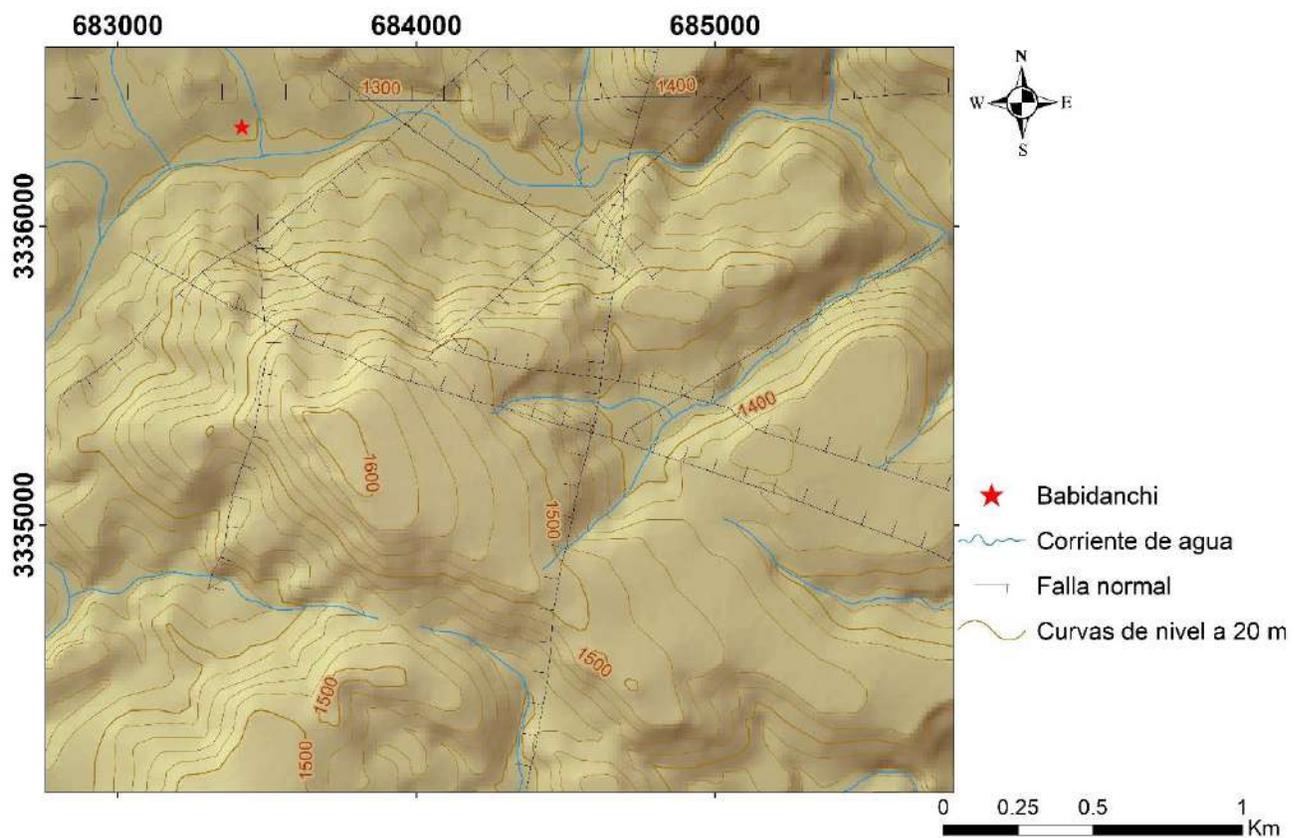
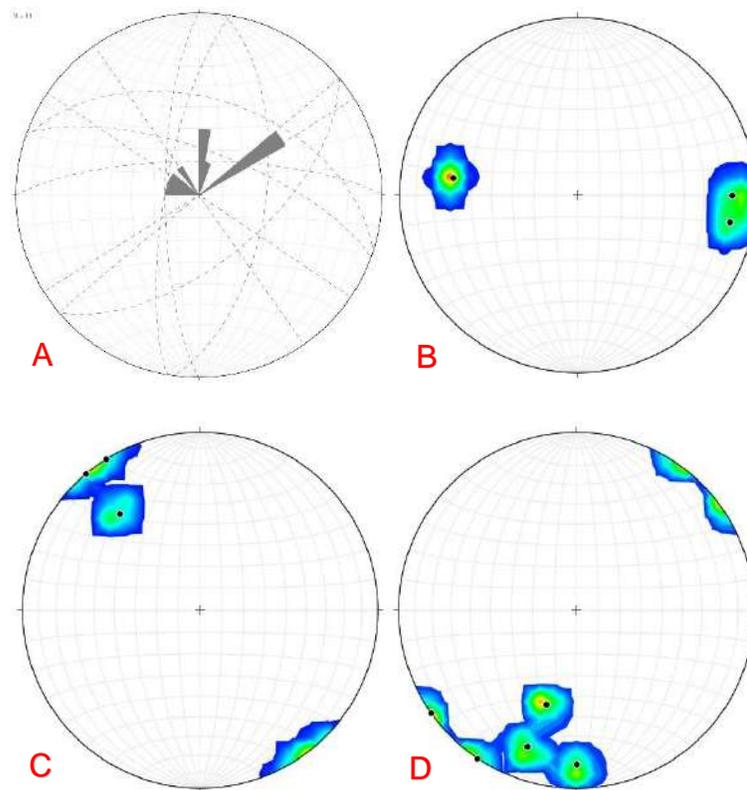


Figura 5. Mapa de relieve: fallas estructurales medidas en campo.

En el área de estudio están presentes al menos tres grupos de fallas (*Figura 6A*), en las cuales hay fallas normales con preferencias de rumbo de alrededor de  $50^{\circ}\text{Az}$  (*Figura 6C*) y otras cercanas a los  $300^{\circ}\text{Az}$  (*Figura 6D*). En su mayoría, estos dos grupos de fallas cuentan con buzamientos que tienden a la vertical, en cambio, también se puede encontrar un grupo de fallas con tendencias a rumbo norte-sur buzando aproximadamente  $60^{\circ}\text{Az}$  (*Figura 6B*). Los siguientes diagramas de roseta representan el comportamiento de estos planos estructurales.



*Figura 6. Diagramas de planos de fallas y roseta, y polos de planos de fallas. Se realizaron en el software Stereonet; (A) Diagrama de roseta y planos de falla representando los 3 tipos de tendencias encontradas en el área de estudio, en línea punteada se representan las distintas tendencias de planos y en polígono gris se muestran las tres tendencias del diagrama de roseta. (B) Diagrama de polos de planos de fallas con tendencias de rumbo norte-sur. (C) Diagrama de polos de planos de fallas con tendencias cercanas a los  $50^{\circ}\text{Az}$ . (D) Diagrama de polos de planos de fallas con tendencias cercanas a los  $300^{\circ}\text{Az}$ .*

Como mencionan *Cochemé y Demant (1991)*, las secuencias de intercalaciones de basaltos, andesitas basálticas y riolitas de la secuencia bimodal emplazadas en algunas regiones del estado de Sonora durante el Oligoceno-Mioceno, presentan fallamiento originado por una fase extensional, por lo que hay que mencionar que este fallamiento es concordante con los datos mostrados en el presente trabajo. El volcanismo bimodal relacionado con una extensión tectónica previa a la fase de formación de la provincia del Basin & Range muestra alineaciones con rumbos preferenciales al NNW de conductos volcánicos alimentadores (*Cochemé y Demant, 1991*). Al este del estado de Sonora los *graben* y/o semi-*graben* formados por fallamiento normal son esencialmente asimétricos debido a la rotación de bloques a lo largo de fallas lístricas. Además, se observan extensiones que van de 40° a 64° azimutales, y representan fallamiento regional de entre 320° y 350° azimutales, lo cual ha formado cuencas y ha permitido el depósito de sedimentos de la Formación Báucarit. La siguiente dirección extensional está orientada entre 288° y 304° azimutales que corresponde a fallas normales que tienden entre 350° y 20° azimutales, se infiere por la ley de corte que el fallamiento es más joven, ya que se presenta cortando a los depósitos de las cuencas (*Cochemé y Demant, 1991*).

Al analizar la investigación de *Cochemé y Demant (1991)* se concluye que sus datos estructurales son similares con el fallamiento medido en la elaboración del trabajo de campo de esta investigación, esto se puede observar en la *figura 6A*.

## PETROGRAFÍA

Del total de muestras que se obtuvieron en campo, solo a las rocas perlíticas (22) se les realizaron secciones delgadas, en su correspondiente estudio petrográfico se tomaron algunas fotomicrografías que logran hacer mayor énfasis en su caracterización. Estas corresponden a las distintas facies del depósito perlítico como facies con obsidiana, bloques pumicíticos, brechas y flujos perlitizados, que presentan características variables: (1) limpidez, (2) cambios texturales, (3) alteración, (4) laminaciones y bandeamiento, (5) grado de perlitización, y (6) deleznableidad (*Tabla 1*). A continuación, se presentan las descripciones petrológicas de las muestras más representativas que conforman grupos petrológicos, acompañadas de sus respectivas fotomicrografías. Este análisis petrográfico se llevó a cabo en un microscopio con cámara, de marca Leica EC3 de la Universidad de Sonora.

Muestra	Texturas	Minerales presentes	Material analizado	Litofacies del depósito
PB16-12	Afanítica	Escasa magnetita	Riolita	Obsidiana
PB16-13	Afanítica	Escasa magnetita	Riolita	Obsidiana
PB16-05	Perlítica	Ausentes	Perlita roja	Perlita fluidal
PB16-25	Perlítica templada	Fayalita, OxFe-Ti	Perlita roja	Perlita fluidal
PB16-17	Matriz desvitrificada	Cuarzo y zeolita	Brecha perlítica	Cobertura perlítica
PB16-22	Perlítica fibrosa	Magnetita, OxFe-Ti, cuarzo	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-29A	Perlítica fibrosa	Cuarzo, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-C1	Perlítica oscura	Magnetita, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-C6B2	Perlítica fibrosa	Fayalita, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-01	Tobacea	Cuarzo, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita tobácea
PB16-27	Perlítica laminar	Cuarzo, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-C6B	Perlítica fibrosa	Cuarzo, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-15	Perlítica vitrea	OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-18	Perlítica vitrea	Fayalita, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-C6A	Perlítica fibrosa	Cuarzo, OxFe-Ti	Perlita gris	Perlita fluidal
PB16-28A	Perlítica	Magnetita, OxFe-Ti	Gravilla de perlita	Perlita fluidal
PB16-28B	Perlítica	Magnetita, OxFe-Ti	Gravilla de perlita	Perlita fluidal
PB16-19	Perlítica vitrea	Magnetita, OxFe-Ti	Perlita gris y rojo	Perlita fluidal
PB16-20	Perlítica vitrea	Magnetita, OxFe-Ti	Perlita gris y rojo	Perlita fluidal

Tabla 1. Muestras analizadas bajo el microscopio petrográfico.

## LAS FACIES CON OBSIDIANA

Las muestras riolíticas de obsidiana (*Figura 7 y Figura 8*) estudiadas presentan una textura afanítica, y tamaños entre 3 y 4 centímetros. Este tipo de roca también es conocida como *marekanita*, y en esta localidad es posible encontrarlas en tamaños hasta de 10 centímetros. Se dice que estas dos muestras son límpidas en lámina delgada, ya que no presentan enturbiamiento ni opacidades, es decir son transparentes. Sin embargo, tienen un bandeamiento laminar asociado al flujo de la lava, donde se observan muy escasos cripto-cristales y microlitos. Estos diminutos cristales cuentan con formas capilares (triquitas) y semiglobulares (desde 10 micras hasta menores a la micra). Estas triquitas en pocas ocasiones se encuentran en desorden o casi perpendiculares al bandeamiento. Además, se observan muy escasos cristalitos automorfos (longitud = 5 – 40 micras) de feldespatos (alcalino?) orientados de manera paralela al bandeado.

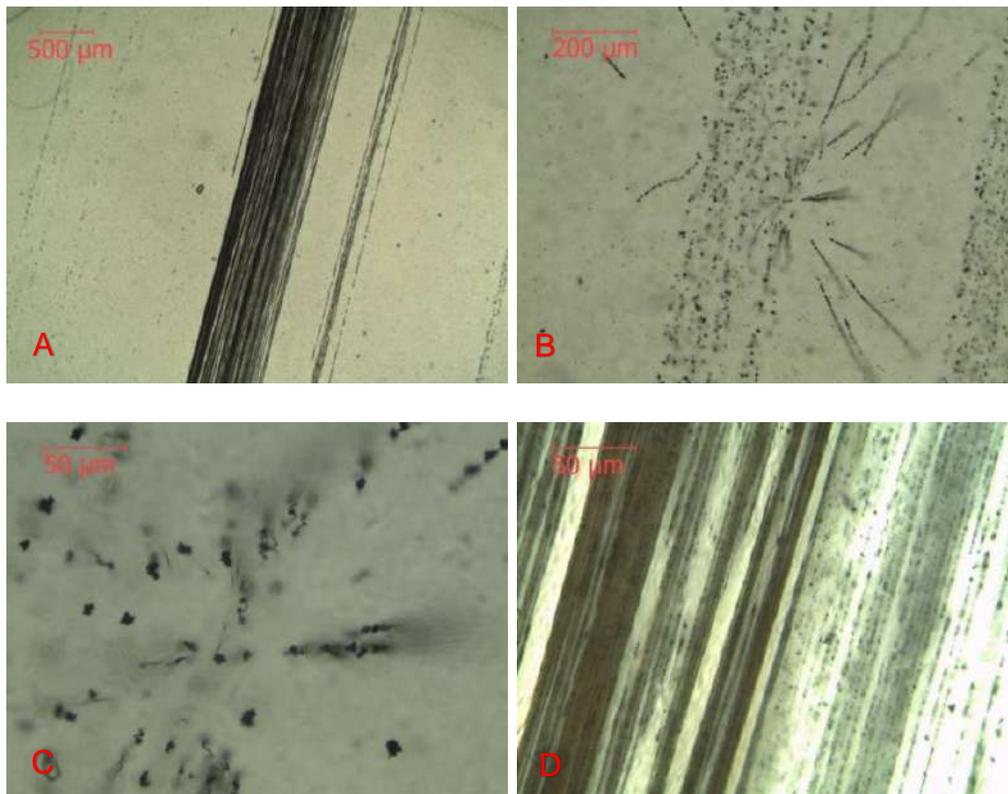


Figura 7. Muestra **PB16-12**: (A) Bandas fluidales laminadas paralelamente, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Banda de flujo con triquitas laminadas y en desorden, bajo luz natural y un objetivo de 10X; (C) Triquitas en desorden, bajo luz natural y un objetivo de 40X; (D) Bandedo paralelo grueso y fino compuesto por triquitas y automorfos, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

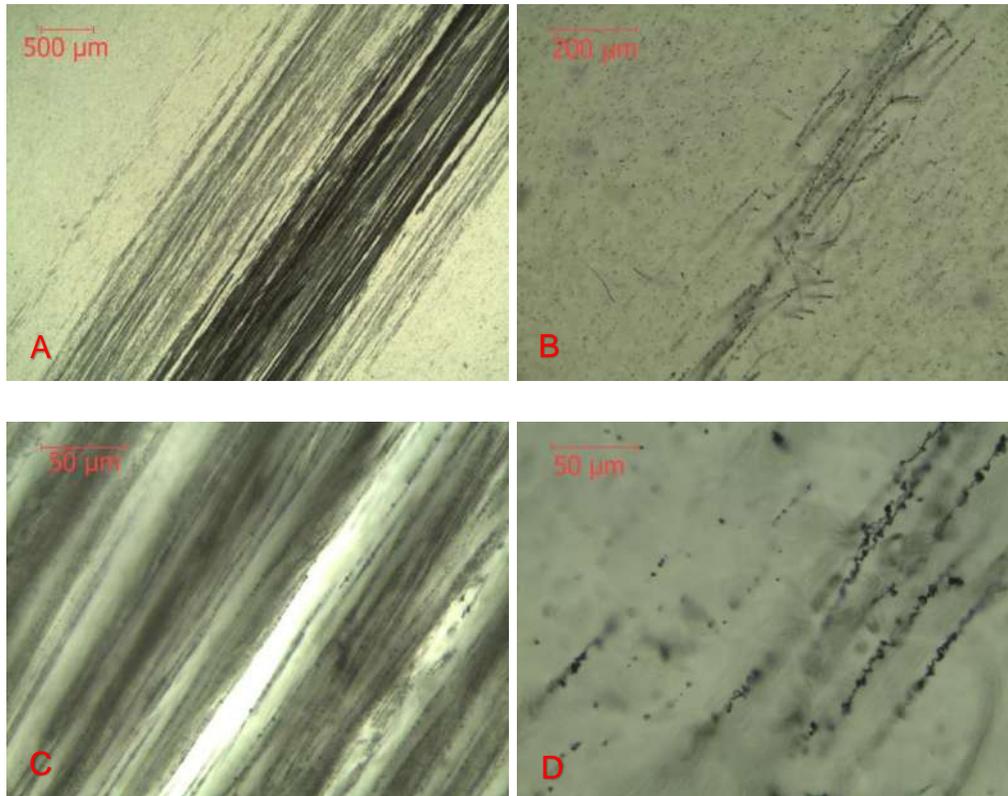


Figura 8. Muestra **PB16-13**: (A) Bandeo de microlitos opacos, bajo luz natural y un objetivo 2.5X; (B) Bandeo de microlitos opacos en desorden, bajo luz natural y un objetivo 10X; (C) Bandeo de microlitos opacos, bajo luz natural y un objetivo 40X. (D) Bandeo de microlitos opacos en desorden, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

## CAMBIOS TEXTURALES

Este grupo de litofacies presenta distintos cambios texturales que corresponden a cambios en el aspecto de las muestras de perlita en el campo, que regularmente se traducen en diferencias de coloración o textura. Este muestreo observado en detalle al microscopio permite conocer su origen.

Las muestras de perlita con colores rojizos presentan en el microscopio (*Figura 9*) una matriz vítrea con una textura perlítica bien desarrollada, mineralógicamente tienen micro-fenocristales y cripto-cristales de óxidos de Fe-Ti (Longitud= 10 micras a menores a la micra) en formas de triquitas y semiglobulares, además de micro-fenocristales de fayalita

(Longitud=5-10 micras). En algunas regiones se presenta zonas con un temple (*Figura 10*), en donde se relaciona una desvitrificación, vetillas de cuarzo e inclusiones fluidas. Estas muestras no presentan alteración.

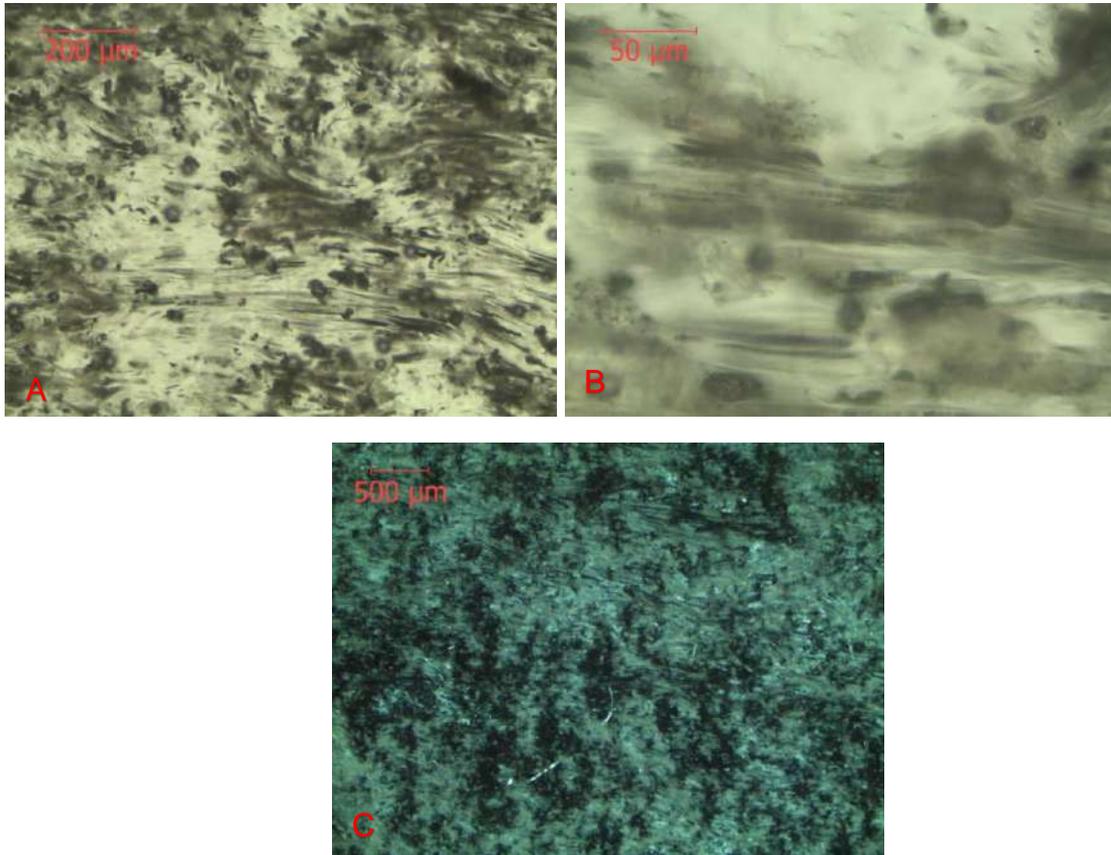


Figura 9. Muestra **PB16-05**: (A) Textura vesicular, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 2.5X; (B) Bandedo ligeramente contorsionado en matriz vítrea, bajo luz natural y un objetivo de 10X; (C) Inclusiones fluidas y alteración a sericita, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

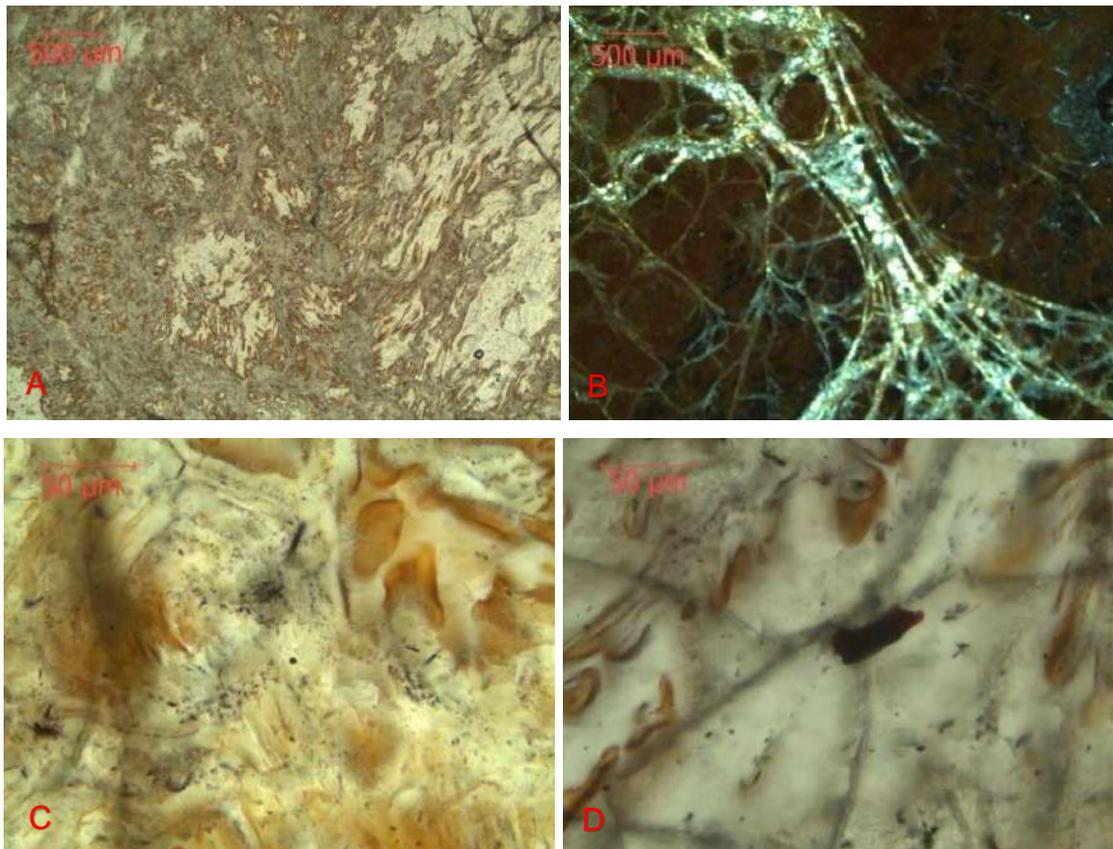


Figura 10. Muestra **PB16-25**: (A) Secciones de temple, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Vetillas de cuarzo-zeolita en una textura perlítica, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 2.5X; (C) Opacos de óxidos de Fe-Ti, bajo luz natural y un objetivo de 40X; (D) micro-fenocristal de Fayalita, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

## LITOFACIES DE BRECHA ENVOLVENTE

La muestra de la brecha perlítica que se presenta como un cuerpo envolvente al domo perlítico, cuenta como característica principal que contiene fragmentos perlíticos en una matriz zeolitizada. En la sección delgada de esta muestra se observa una brecha con fragmentos de perlita, con una matriz de arcilla y zeolita que contiene vetillas de cuarzo (Figura 11). En sección delgada las muestras de los **bloques con textura pumicítica**, muestran una textura altamente vesicular, con un bandeamiento asociado al flujo, que va de ligeramente a muy contorsionado. Estas muestras están ligeramente alteradas a sericita y contienen inclusiones fluidas, además de escasos micro-fenocristales de zircón como mineral accesorio.

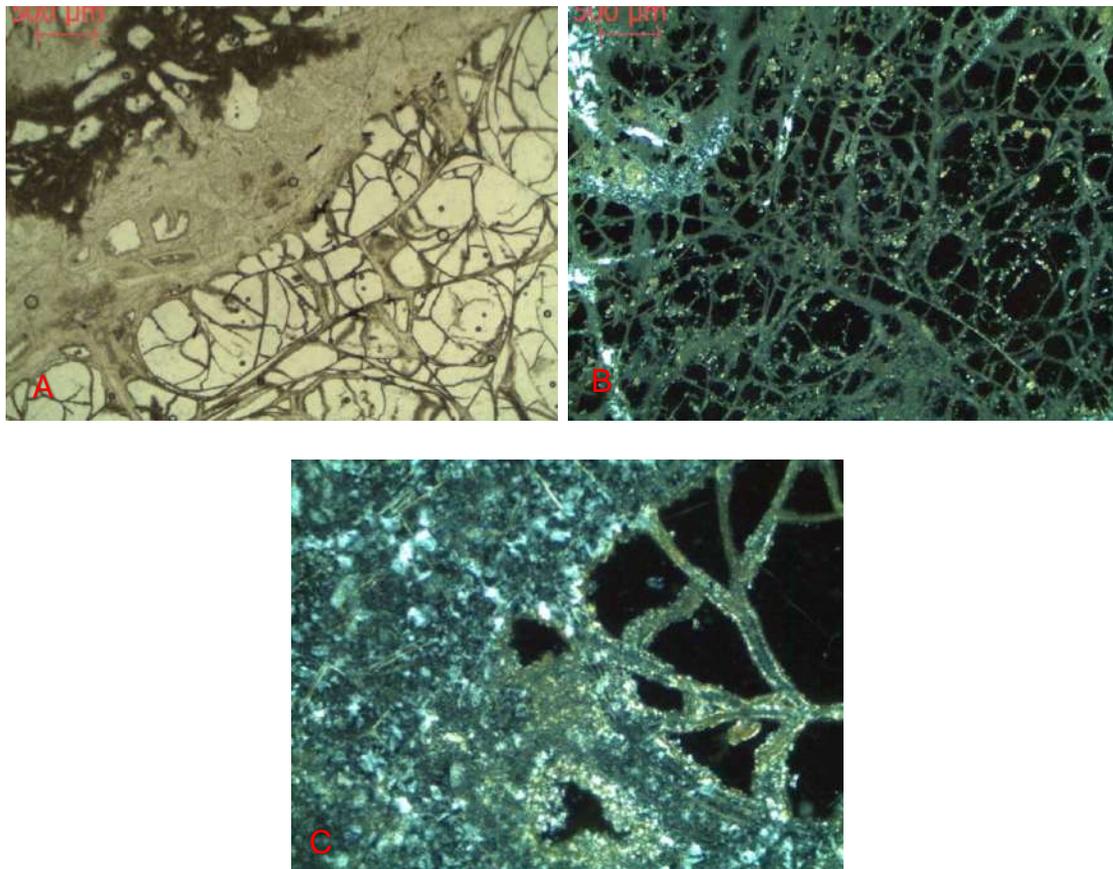


Figura 11. Muestra **PB16-17**: (A) Contacto entre fragmento riolítico, matriz y zeolita, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Vetillas desvitrificadas, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 2.5X; (C) Vetillas de cuarzo y feldespato alcalino, bajo luz polarizada y un objetivo de 10X.

## PERLITAS CON FACIES FLUIDALES

La gran mayoría de los afloramientos de los cuerpos perlíticos del área de estudio cuentan con laminaciones o un bandeamiento que es reconocido por un cambio en la coloración de la matriz. En el microscopio se ha determinado que esta textura se origina por la presencia de una mayor densidad de minerales alineados en el flujo (Figura 12, 13, 14 y 15). Esta densidad mineral o laminaciones le otorgan coloraciones más oscuras a la roca, en ocasiones rojizas por alto contenido de fayalita. Estas laminaciones las encontramos de manera paralela o contorsionadas según su flujo, y compuestas por distinta proporción de

los mismos tipos de minerales, mostrando que la repartición de cristales en la roca no es homogénea. Se presenta a manera de minerales esenciales, escasos micro-fenocristales automorfos de Feldespatos Alcalinos y Clinopiroxeno (*Figura 13*), como minerales accesorios contiene zircón, acículas de óxidos de Fe-Ti y “gérmenes” automorfos probablemente de Feldespato Alcalino, piroxeno y óxidos de Fe-Ti. Estos tienen una longitud entre 2 y 5 micras, componen las bandas de flujo en la matriz vítrea afírica, y presentan una orientación preferencial. Además, se presentan regularmente esferulitas de desvitrificación (diámetros= 40-150 micras con cristales radiales de Cuarzo y Feldespato Alcalino), y vetillas como los rellenos de fracturas de forma principalmente recta y transversal donde se desarrollan arcillas.

En ocasiones la acumulación de acículas de magnetita en estas laminaciones forma glómeros que son apreciables en luz polarizada bajo el microscopio (*Figura 14*), se observa una matriz vítrea con textura perlítica moderadamente desarrollada, laminaciones fluidales muy contorsionadas, esferulitas de desvitrificación orientadas al bandeado contorsionado, que en ocasiones son acompañadas por acículas y glómeros de óxidos de Fe-Ti. Además, se observan cripto-cristales automorfos, microlitos opacos y muy escasa biotita. Algunas de las acículas de Fe-Ti tienen longitudes de 5 a 120 micras y las esferulitas presentan un diámetro de 5 a 55 micras.

En zonas donde hay acumulaciones de fayalita se observa que las laminaciones son de color rojizo en el microscopio con luz polarizada y analizada (*Figura 15*), se observa una matriz vítrea de textura perlítica bien desarrollada con desvitrificación y alteración a sericita, presenta bandeado paralelo compuesto por microlitos y cripto-fenocristales orientados de fayalita y minerales opacos con formas de triquita y semiglobulares. Cabe señalar que el bandeamiento rojizo formado por fayalita disgregada presenta extinción ondulante, además se observan inclusiones fluidas en zonas de fractura además de escasos cristalitos automorfos en bandeado, vetillas de cuarzo y muy escasas esferulitas de desvitrificación.

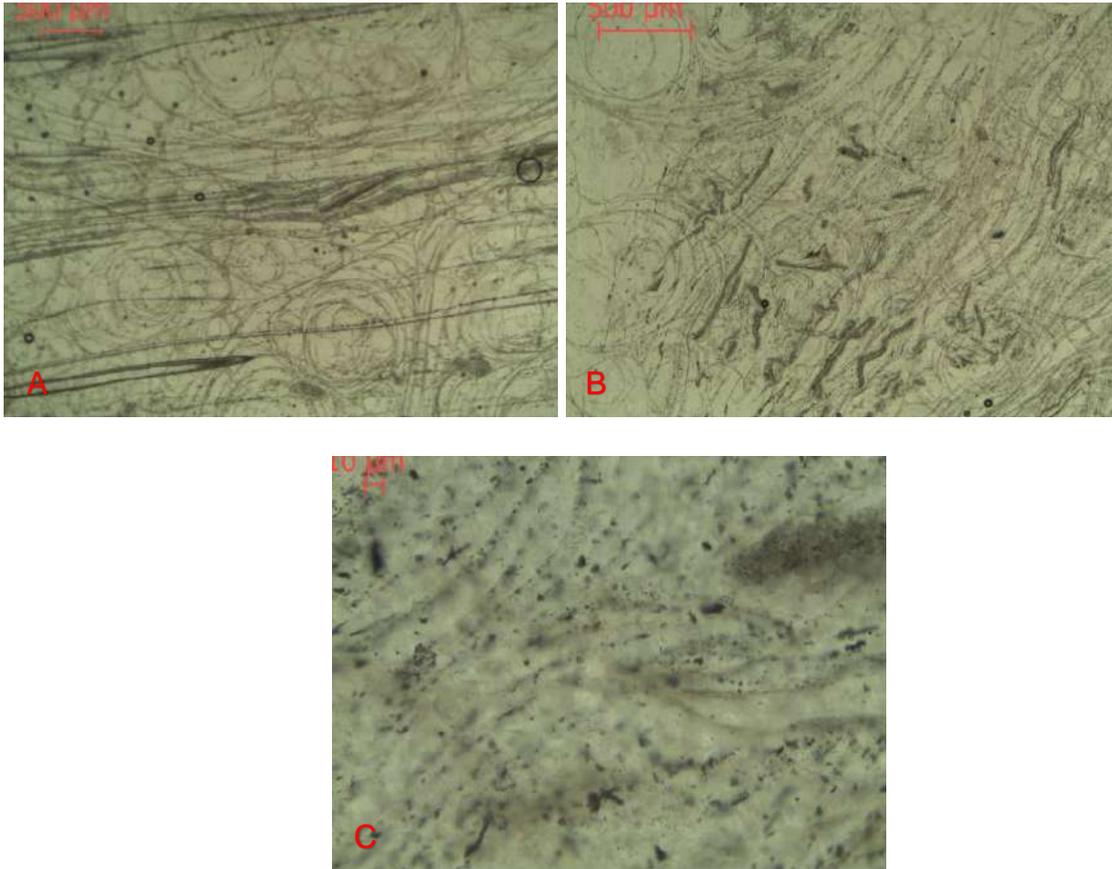
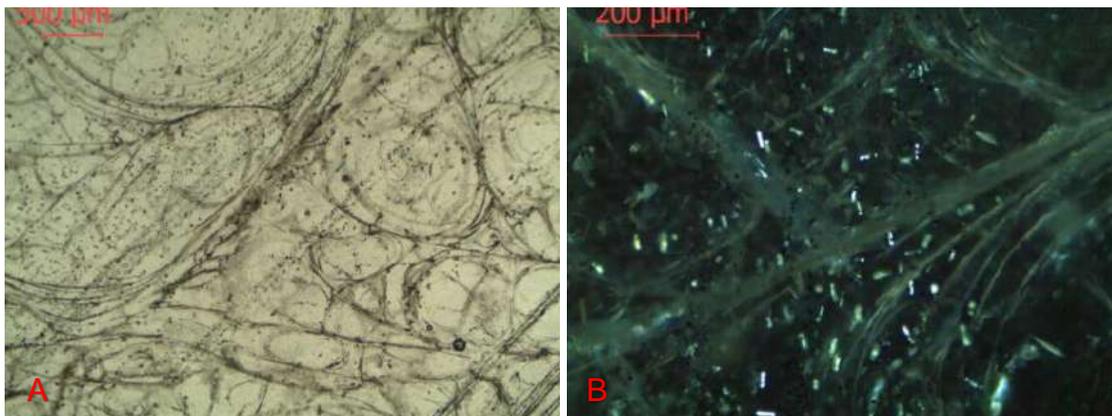


Figura 12. Muestra **PB16-22**: (A) Textura perlítica y bandas de flujo ligeramente contorsionadas, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Textura perlítica y bandeo contorsionado, bajo luz natural y un objetivo de 4X; (C) Cripto-cristales de magnetita formando el bandeo, bajo luz natural y un objetivo de 40X.



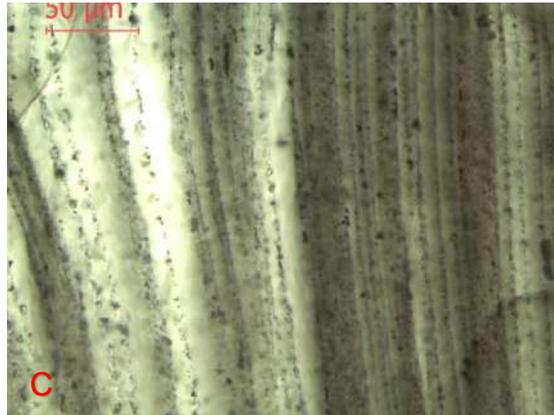
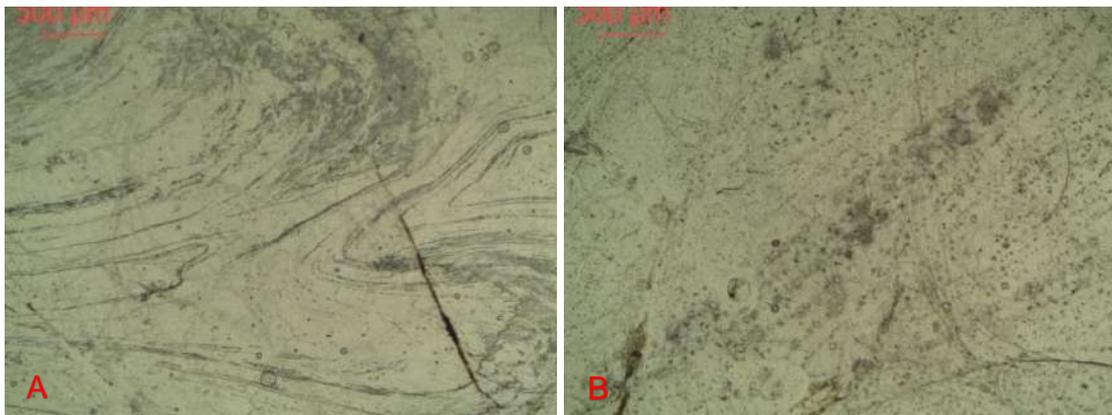


Figura 13. Muestra **PB16-29A**: (A) Textura perlítica y bandas de flujo, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) criptofenocristales automorfos de clinopiroxeno, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 10X; (C) Bandeado de criptocristales, bajo luz natural y un objetivo de 40X.



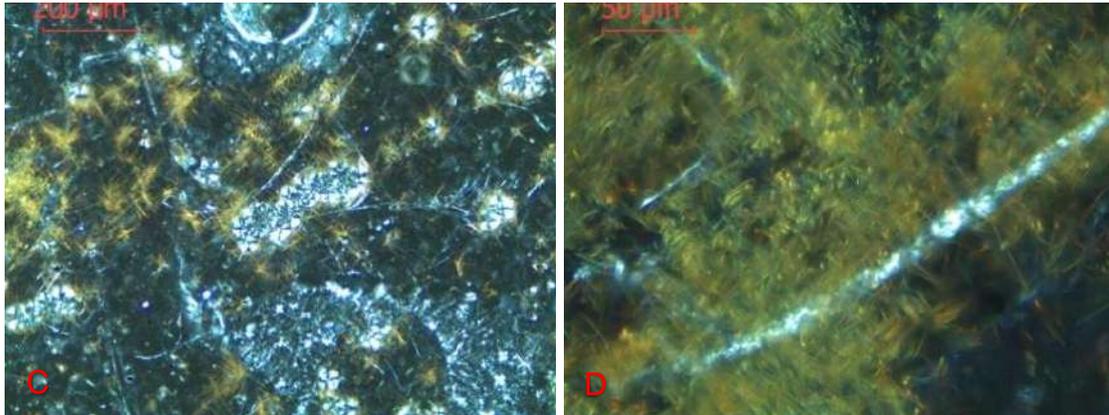


Figura 14. Muestra **PB16-C1**: (A) Bandas de flujo contorsionado, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Esferulitas de desvitrificación, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (C) Acículas de óxidos de Fe-Ti en esferulitas de desvitrificación, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 10X; (D) Glómeros de óxidos de Fe-Ti y vetilla de feldespato alcalino, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 40X.

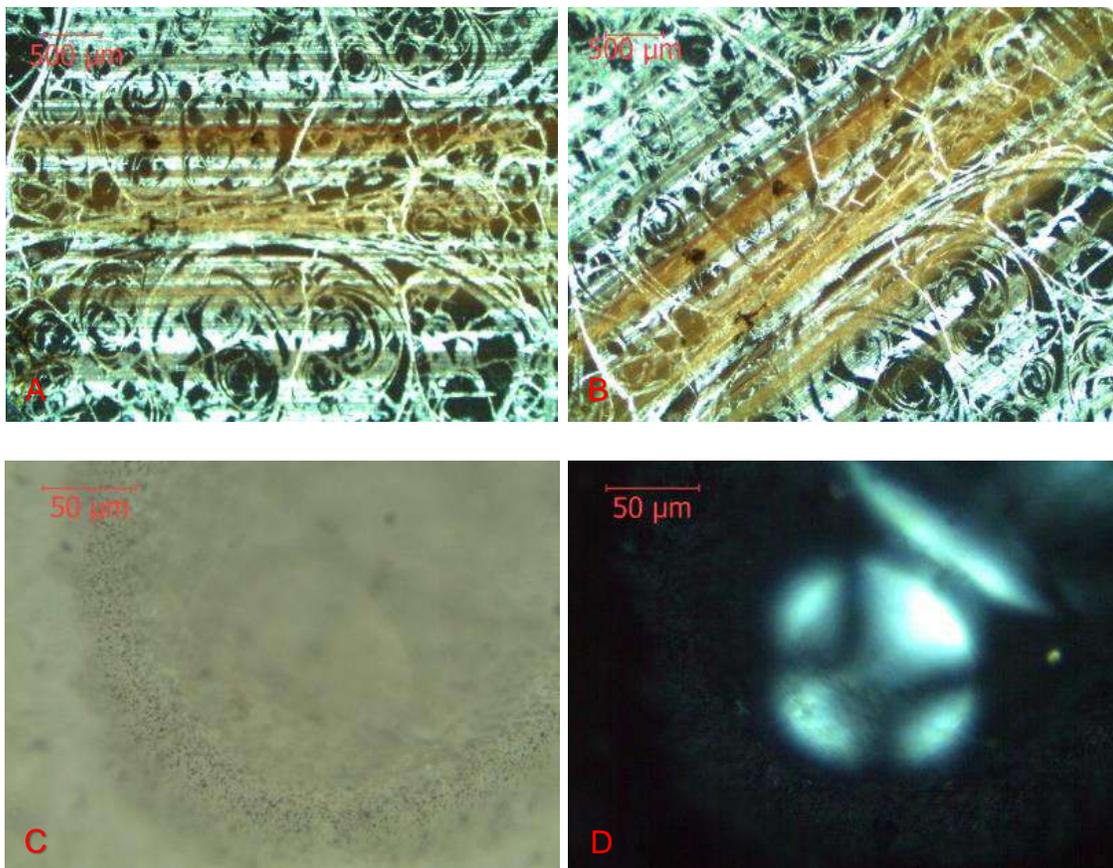


Figura 15. Muestra **PB16-C6B2**: (A) Textura perlítica bien desarrollada y bandeo de fayalita, bajo luz polarizada y analizada y un objetivo de 2.5X; (B) Textura perlítica bien desarrollada y bandeo de fayalita, bajo luz polarizada y un objetivo de 2.5X; (C) Inclusiones fluidas, bajo luz natural y un objetivo de 40X; (D) Esferulita de desvitrificación, bajo luz polarizada y un objetivo de 40X.

## **GRADO DE PERLITIZACIÓN**

A continuación, se muestra la variedad de riolitas de acuerdo con distintos grados en su textura perlítica o grado de perlitización, estos se clasifican de moderado a bien desarrollado. Hay que mencionar que las geometrías de este desarrollo son ligeramente variables, pero generalmente con tendencias a la esfericidad, y que frecuentemente podemos encontrar aparentes inclusiones fluidas asociadas en este fracturamiento, además de minerales producto de alteración por desvitrificación o zeolitización.

Al analizar las muestras en el microscopio se observa una matriz vítrea de textura fluidal y fractura perlítica (*Figura 16 a 23*), la muestra PB16-01 presenta textura perlítica bien desarrollada con desvitrificación y alteración a sericita, presenta ligero bandeamiento por microlitos de fayalita(?) y microlitos de “gérmenes” opacos en bandeamiento fibroso, contiene vetillas de cuarzo, fragmentos riolíticos fuertemente alterados e inclusiones fluidas en zonas de fractura. Presenta alteración sericita y desvitrificación, con micro-fenocristales y cripto-cristales en bandas de flujo (*Figura 16*). La muestra PB16-27 presenta una textura perlítica bien desarrollada, presenta cripto-cristales en su mayoría menores a 5 micras hasta 25 micras orientados al bandeo, presenta vetillas de cuarzo y feldespatos alcalinos, además de alteración a sericita y desvitrificación (*Figura 17*). La muestra PB16-C6B presenta textura perlítica bien desarrollada con escaso bandeamiento paralelo y contorsionado compuesto por cripto-cristales y microlitos opacos, presenta inclusiones fluidas en zonas de fractura, contiene escasos microlitos automorfos en el bandeo y cripto-cristales rojizos en bandeo muy contorsionado fibroso además de ligeras vetillas de cuarzo (*Figura 18*). La muestra PB16-15 presenta un buen desarrollo de su textura perlítica, presenta micro-fenocristales y cripto-cristales orientados en bandas de flujo, estos cristales no pudieron ser identificados por este método. Además, cuenta con pequeñas inclusiones fluidas visibles en zonas de fractura, presenta alteración a sericita y desvitrificación en fracturas (*Figura 19*). La muestra PB16-18 presenta una con textura perlítica bien desarrollada con bandeamiento en fibras, se observan vetillas de arcilla y cripto-cristales menores a 5 micras que componen el bandeo. Además, se observan inclusiones fluidas visibles en zonas de fractura (*Figura 20*). La muestra PB16-C6A presenta una textura perlítica bien desarrollada con

bandeamiento paralelo cortado por microfallas y/o vetillas de cuarzo, feldespato alcalino y alteración a sericita en fracturas. Presenta microlitos de automorfos y opacos (menores a las 5 micras) con formas de triquitas y en fibras formando el bandeamiento (Espesor = 5-150 micras), además se observan inclusiones fluidas de tamaños menores a la micra en el fracturamiento perlítico (Figura 21). La muestra PB16-20 presenta buen grado de desarrollo en su textura perlítica, contiene inclusiones fluidas en su fractura concoide, laminaciones de minerales oxidados (fayalita) con textura fibrosa (Figura 22). La muestra PB16-19 presenta un buen desarrollo de su textura perlítica con laminaciones paralelas de minerales opacos y laminaciones con textura fibrosa de criptocristales de fayalita, además en la fractura concoide se observan inclusiones fluidas (Figura 23).

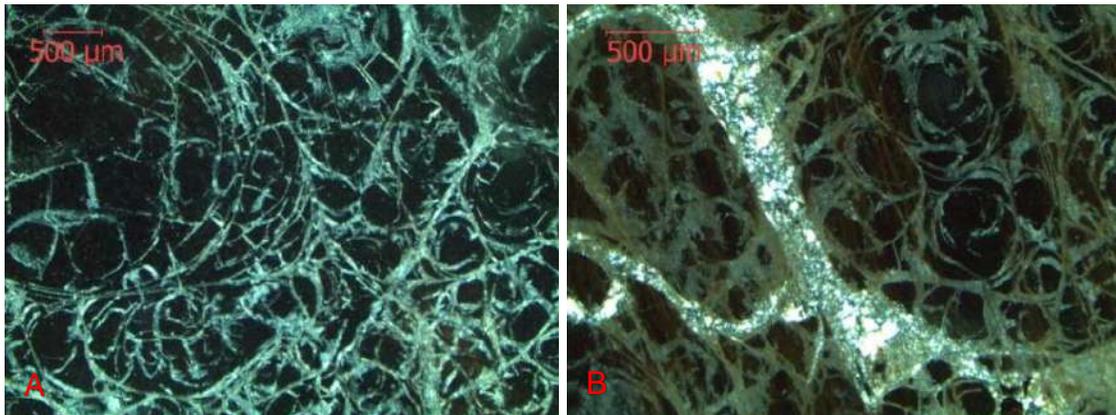
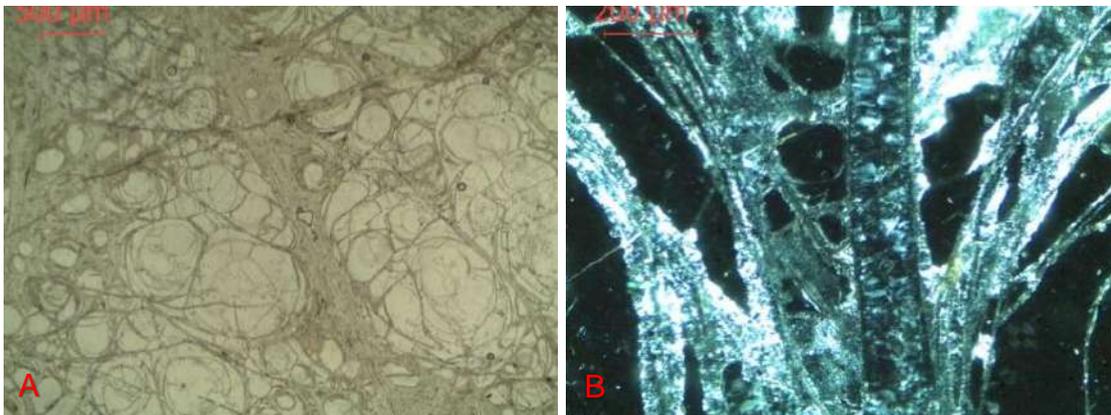


Figura 16. Muestra **PB16-01**: (A) Textura perlítica bien desarrollada desvitrificada en zonas de fractura, bajo luz polarizada y analizada y un objetivo de 2.5X; (B) Vetillas de cuarzo, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 4X.



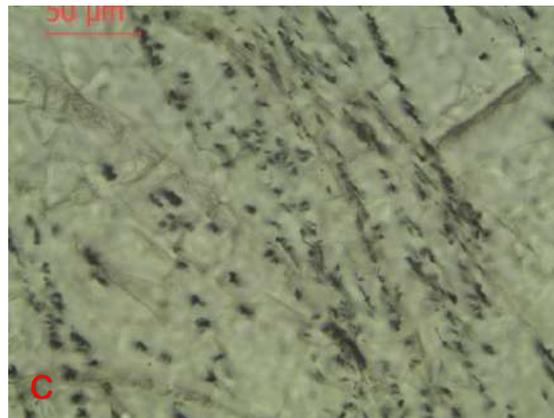


Figura 17. Muestra **PB16-27**: (A) Textura perlítica y bandas de flujo, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Vetillas de desvitrificación compuesta de cuarzo y feldespato alcalino, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 10X; (C) Cripto-cristales automorfos en bandeado, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

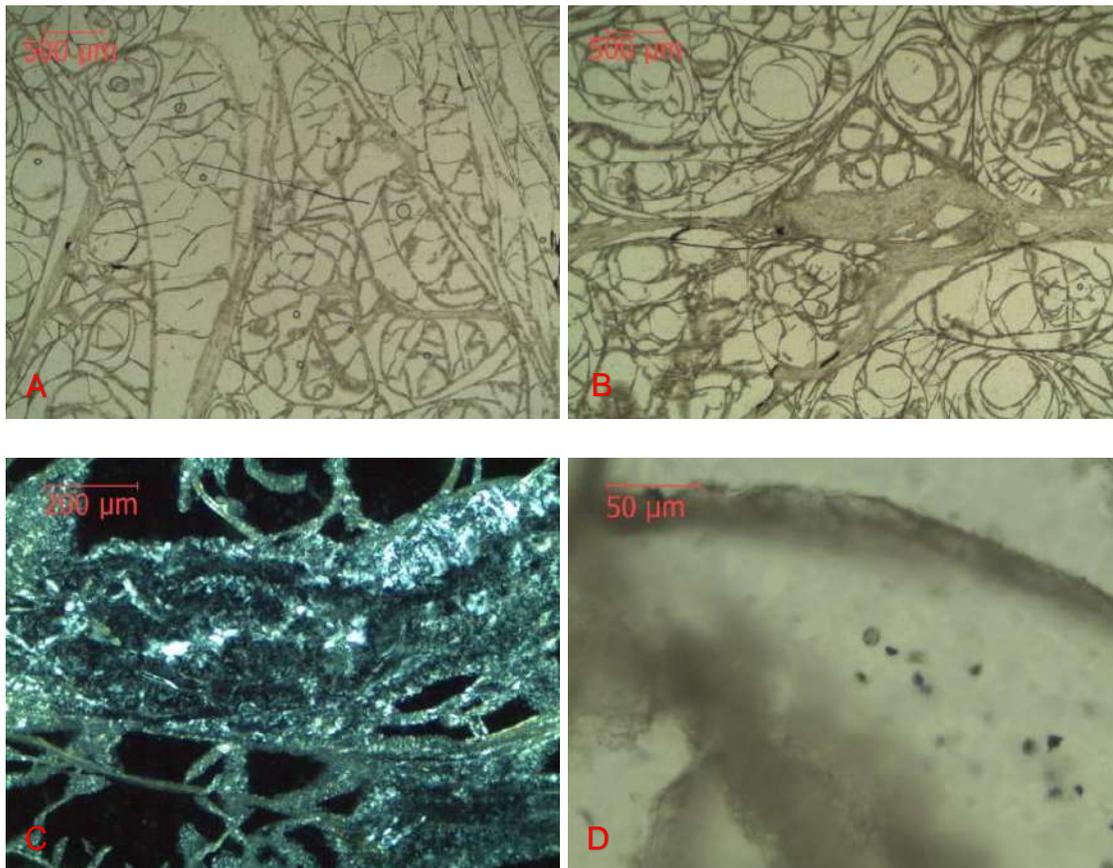


Figura 18. Muestra **PB16-C6B**: (A) Textura perlítica desvitrificada en zonas de fractura, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Textura perlítica desvitrificada en zonas de fracturas y alteración arcillosa con vetillas de cuarzo, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (C) Vetillas de cuarzo, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 10X; (D) Inclusiones fluidas en zonas de fractura, cristalitas de automorfos y microlitos opacos de formas semiglobulares y en triquitas, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

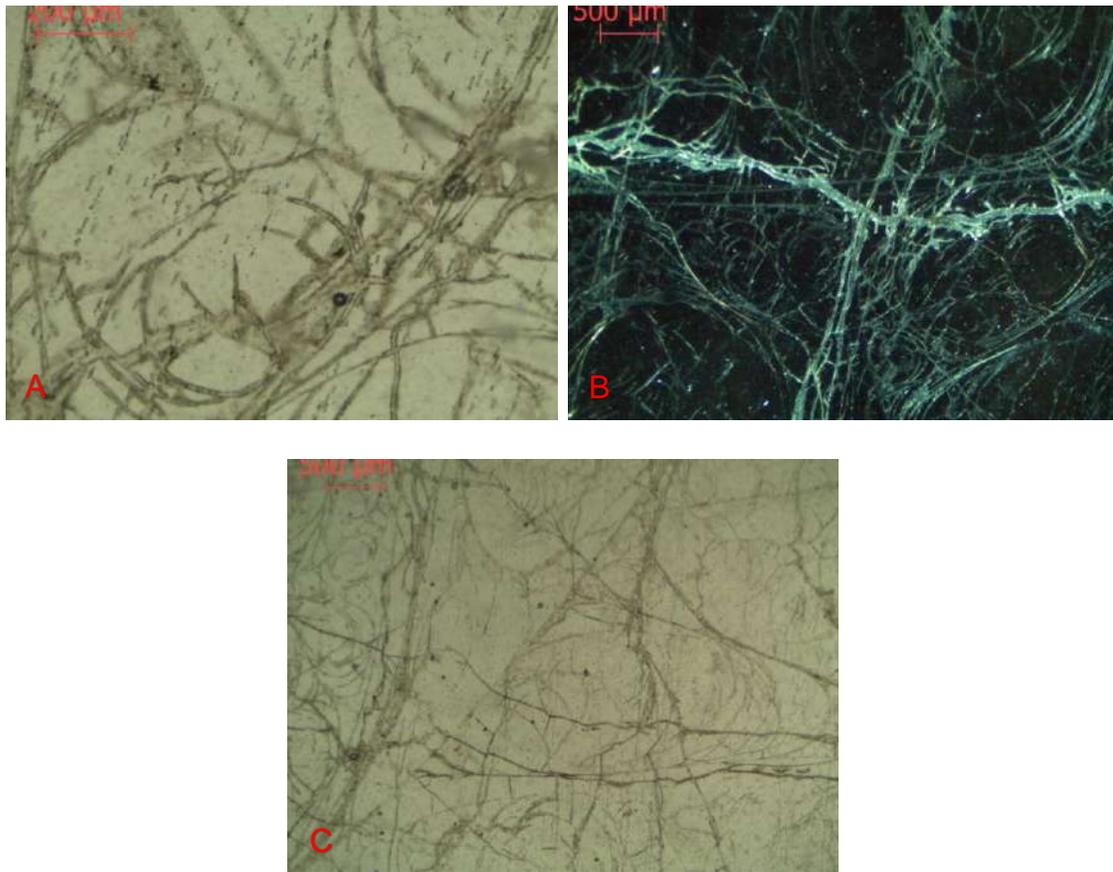
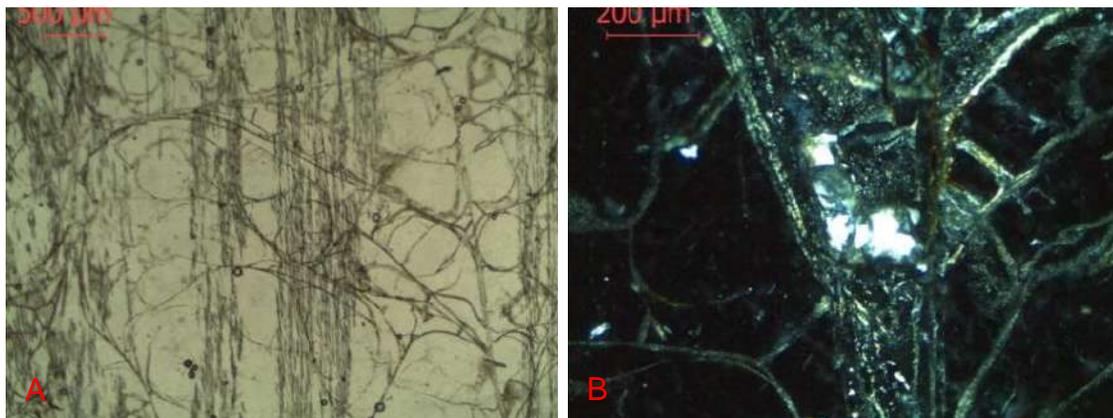


Figura 19. Muestra **PB16-15**: (A) Textura perlítica y escasas bandas de flujo con cristalitas orientados, bajo luz natural y un objetivo de 10X; (B) Vetillas con alteración a sericita, bajo luz polarizada analizada y un objetivo 2.5X; (C) Desvitrificación en vetillas, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X.



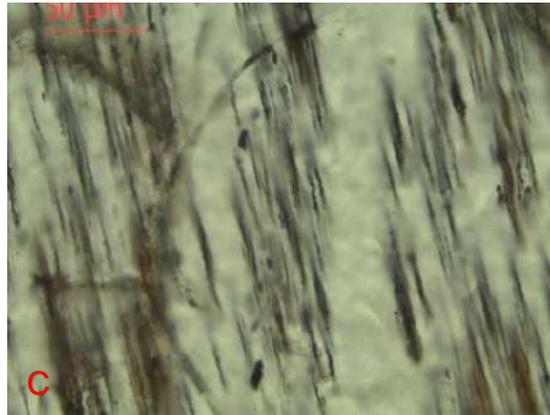


Figura 20. Muestra **PB16-18**: (A) Textura perlítica y bandas de flujo, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Vetillas arcillosas y cristales de calcedonia, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 10X; (C) Bandeamiento con textura fibrosa, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X.

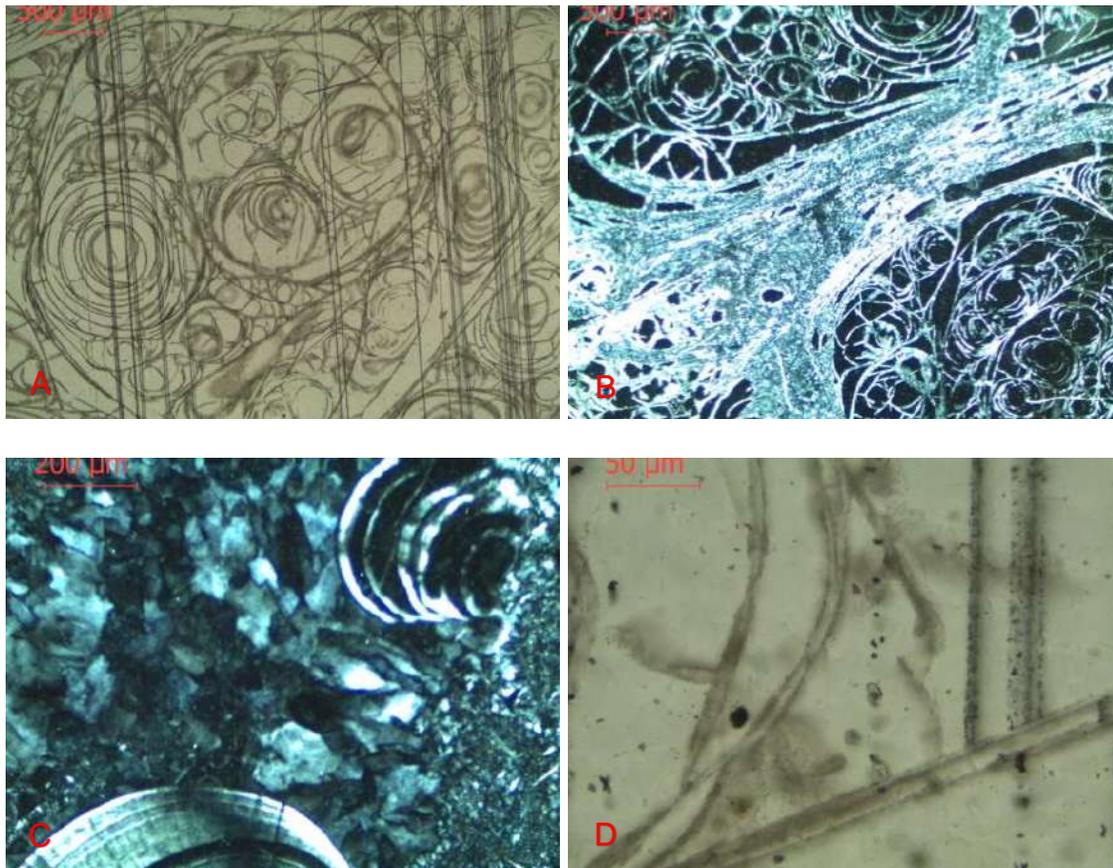


Figura 21. Muestra **PB16-C6A**: (A) Textura perlítica y bandeo paralelo, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X; (B) Vetilla de feldespato alcalino y sericita, bajo polarizada y analizada en un objetivo de 2.5X; (C) Micro-fenocristales de feldespato alcalino en vetillas, y corte de esferulitas, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 10X; (D) Microlitos de feldespato alcalino, cripto-cristales de minerales opacos e inclusiones fluidas en fracturas, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

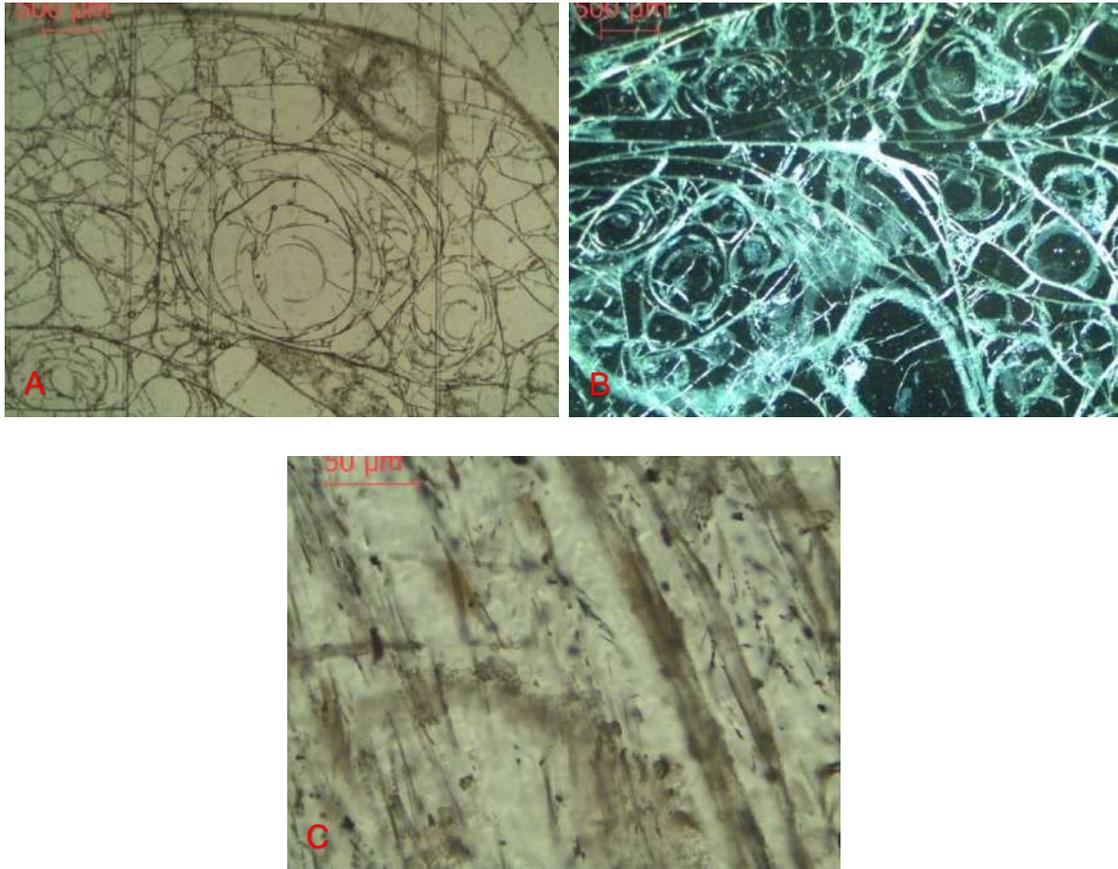


Figura 22. Muestra **PB16-20**: (A) Textura perlítica con inclusiones fluidas en la fractura concoide y minerales opacos formando laminaciones paralelas, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X, (B) textura perlítica bien desarrollada, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 2.5X, (C) laminaciones minerales opacos de textura fibrosa, bajo luz natural y un objetivo de 40X.

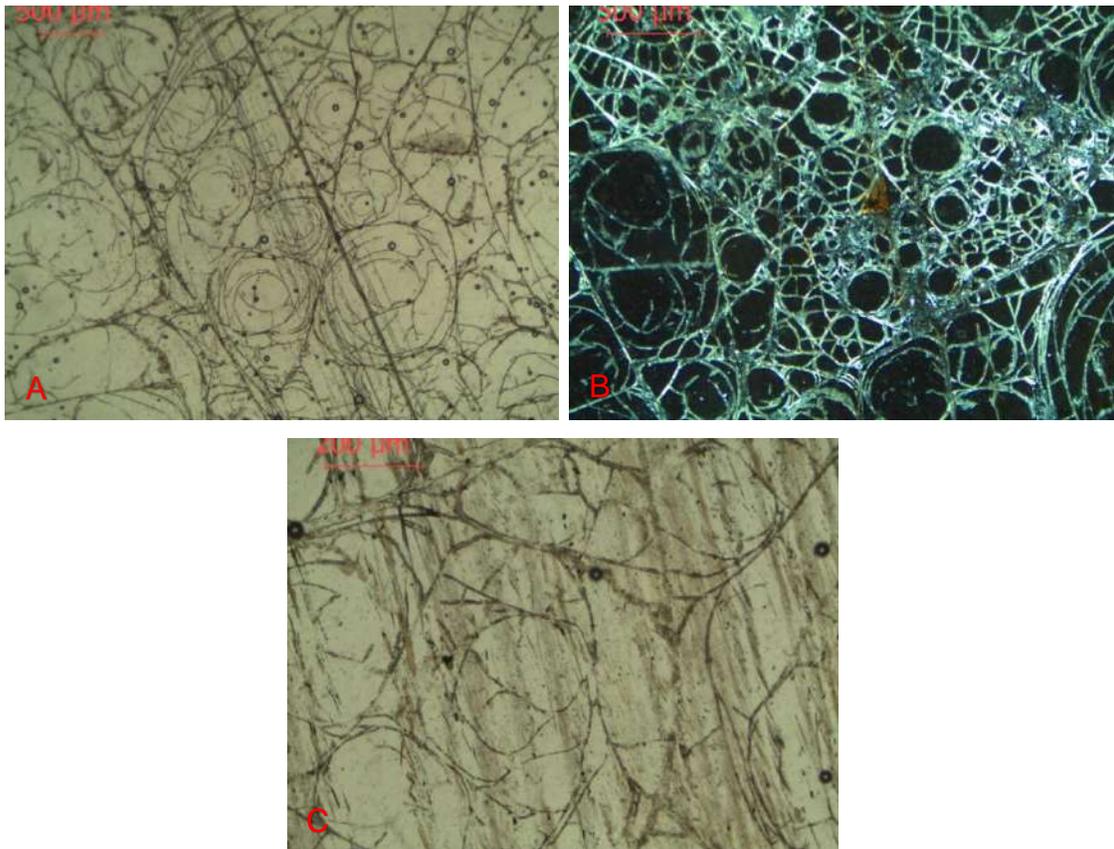


Figura 23. Muestra **PB16-19**: (A) Fractura perlítica bien desarrollada con inclusiones fluidas, laminaciones paralelas de minerales opacos, bajo luz natural y un objetivo de 2.5X, (B) textura perlítica bien desarrollada, bajo luz polarizada y analizada en un objetivo de 2.5X, (C) laminaciones de criptocristales con textura fibrosa, bajo luz natural y un objetivo de 10X.

## GRAVA DE PERLITA

En este apartado se exponen las muestras perlíticas ubicadas al pie de una zona de contacto por falla normal. En los taludes a los márgenes de esta área se encuentran rocas perlíticas altamente fracturadas deleznable, y al centro de esta se observan fragmentos de formas esféricas controladas por la textura perlítica, estos se presentan en tamaños que van de menores al centímetro de diámetro hasta pocos milímetros, además de polvos finos.

Las muestras de gravilla con clave PB16-28A y 28B analizadas en el microscopio (Figura 24 y 25) presentan una matriz vítrea con textura perlítica contiene laminaciones fluidales orientadas en sentido del flujo, hay presencia de cripto-cristales de minerales opacos además de microcristales de entre 30 a 40 micras y cripto-cristales de 10 a 20

micras. Además, se observan escasos gérmenes automorfos con orientación casi perpendicular al flujo. Según el fragmento que se observe, la proporción de las laminaciones de óxidos de Fe-Ti y cristalitas automorfas es variable, estos últimos se presentan como gérmenes tabulares acomodados en el craquelado, y en ocasiones estos cristalitas automorfas cuentan con incrustaciones de óxidos de Fe-Ti con formas semiglobulares y aciculares, la proporción de estos es variable según el fragmento observado.

Hay que mencionar que, para los análisis posteriores a las secciones delgadas, las muestras de gravilla perlítica fueron mezcladas a partes iguales, ya que las muestras fueron recolectadas a unos escasos metros de diferencia una con respecto a la otra, por lo que se considera que en caso de su extracción para expandirla se trabajarán de forma similar.

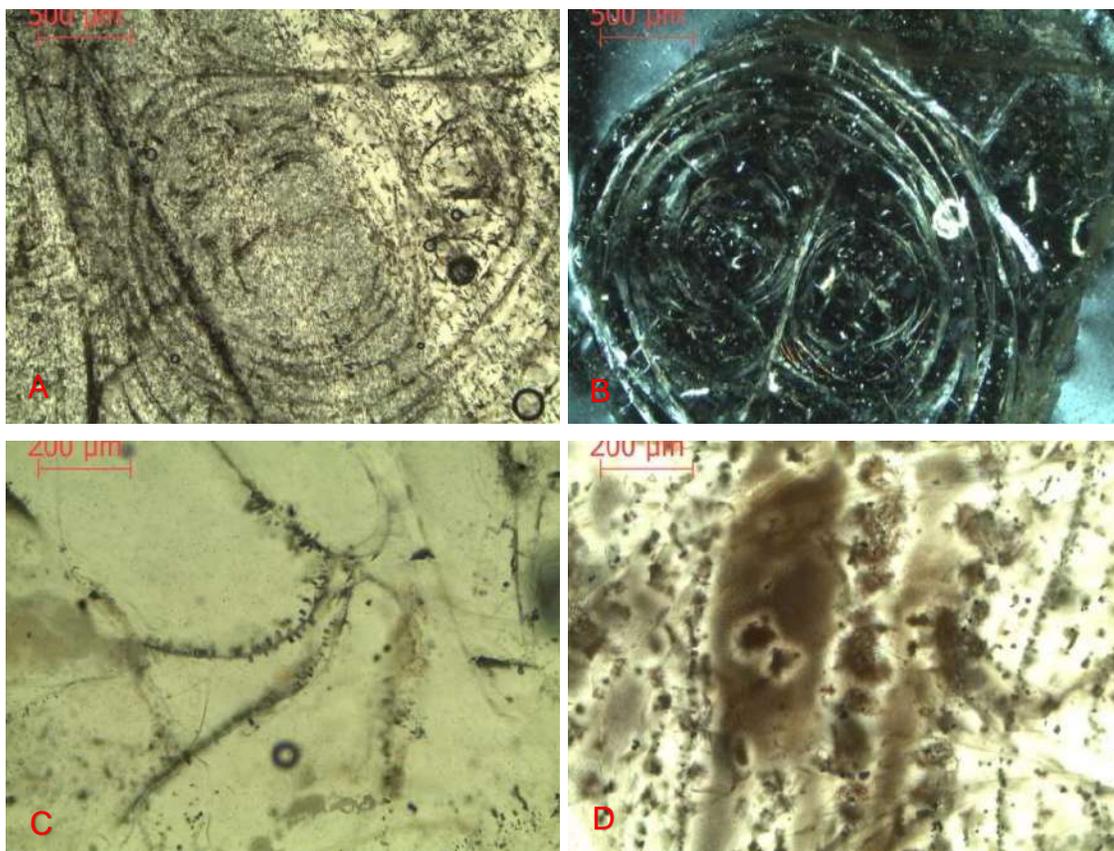


Figura 24. Muestra **PB16-28A**: (A) Textura perlítica y bandas de flujo, bajo luz natural y un objetivo de 4X; (B) Fragmento riolítico con vetillas de arcilla, bajo luz polarizada analizada y un objetivo de 4X; (C) Cripto-cristales alojados en fracturas, bajo luz natural y un objetivo de 10X; (D) Fragmento con microcristales de óxidos de Fe-Ti, bajo luz natural y un objetivo de 10X.

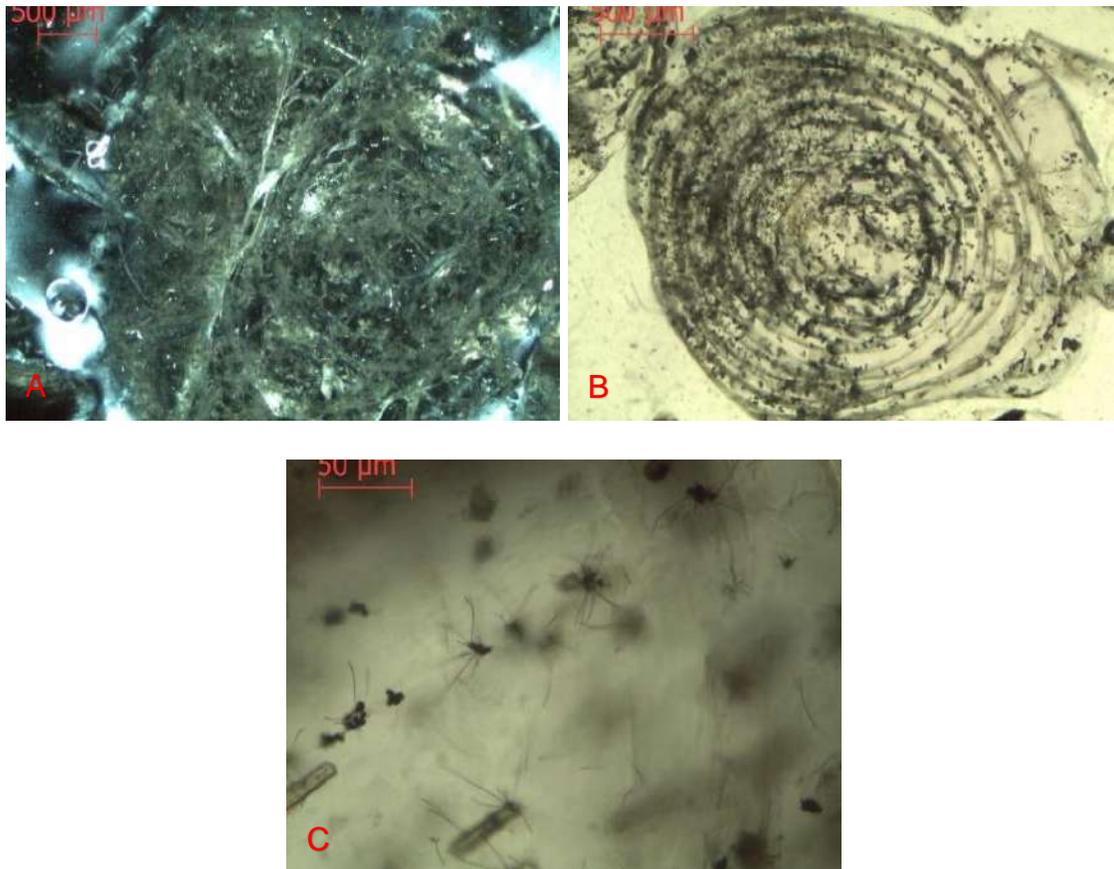


Figura 25. Muestra **PB16-28B**: (A) Fragmento riolítico con alteración a sericita en fracturas, bajo luz polarizada y analizada y un objetivo de 2.5X; (B) Fragmento riolítico con flujo de criptocristales alojados en las fracturas concoides, bajo luz natural y un objetivo de 4X; (C) Cristalitos con incrustaciones de microcristales de óxidos de Fe-Ti, bajo luz natural y bajo un objetivo de 40X.

## DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Esta técnica de análisis es de uso frecuente en la determinación mineral, ya que define la estructura cristalina de los minerales apoyada en el fenómeno de la difracción de rayos X, esto con un volumen muy pequeño de muestra, que además es recuperable y reusable. En el fenómeno de la difracción, los rayos X son difractados por los planos de los cristales de un mineral al incidir sobre ellos con diferentes ángulos, lo que genera un patrón de difracción denominado difractograma. El equipo utilizado es un difractómetro para polvos marca Bruker, modelo D8 Advance con fuente de cobre de longitud de onda 1.5406 Å.

Una vez obtenido el patrón de difracción se hace una comparación de los picos producidos en el difractograma con una base de datos en la que hay estándares de minerales que pueden corresponder a los minerales presentes en la muestra.

Este método se utilizó porque en el microscopio no se lograron identificar algunos minerales demasiado pequeños. Para ello fue necesario moler las bandas de flujo con alta concentración de cristales de las muestras, que fueron trabajadas en duplicados, bajo muestras tamizadas bajo el #100 (CT) y sin tamizar (ST).

En el análisis de DRX fue posible la identificación de minerales de cristobalita, lo que permite fundamentar que el magma se emplazó con una alta temperatura, ya que la presencia de este mineral es indicador de temperatura de cristalización a ~1470°C.

Otros minerales identificados por esta técnica fueron la fayalita y la magnetita (*Figura 26 y 27*) corroborando su identificación en lámina delgada. En el caso de la fayalita solo fue registrado un mineral en sección delgada, en cambio la magnetita es un óxido abundante, pero de una textura no común (triquitas). Otro mineral detectado es la zeolita de tipo clinoptinolita (silicato de aluminio, sodio, potasio, y calcio).

En la *Figura 26* en el eje de las abscisas observamos valores de  $2\theta$  aproximados a 24 en la cresta de nuestro difractograma, estos concuerdan con difractogramas de perlitas de otros yacimientos ([Panagiotis et al, 2016](#)).

(Coupled TwoTheta/Theta)

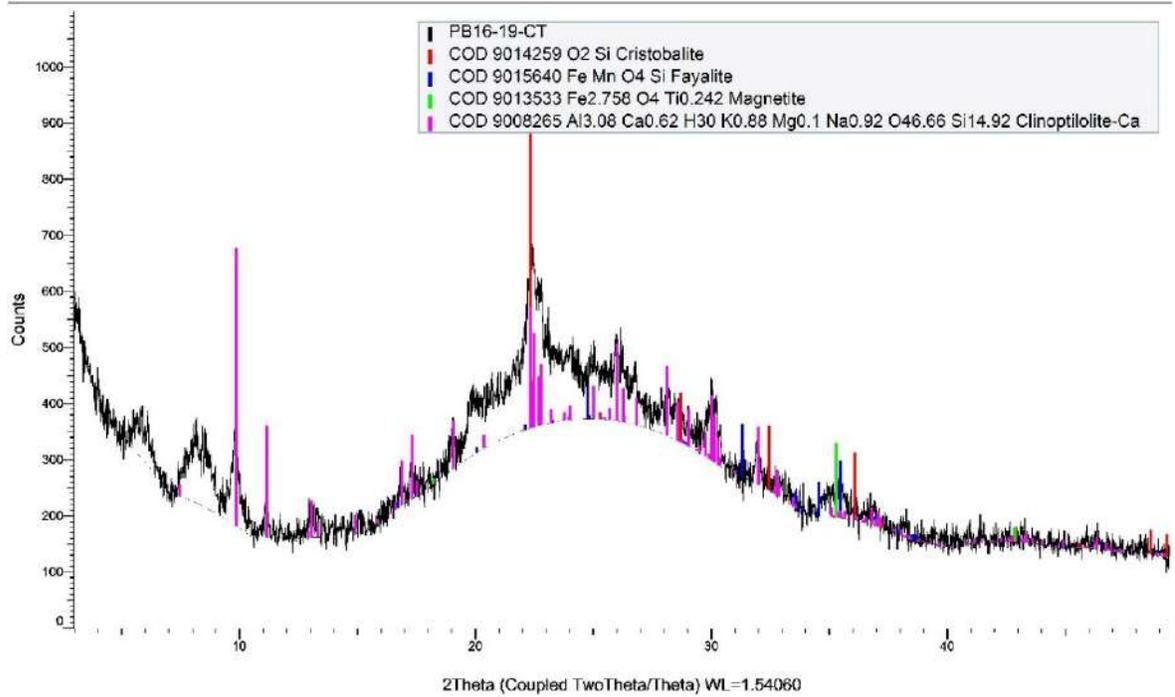


Figura 26. Difractograma de la muestra PB16-19 CT.

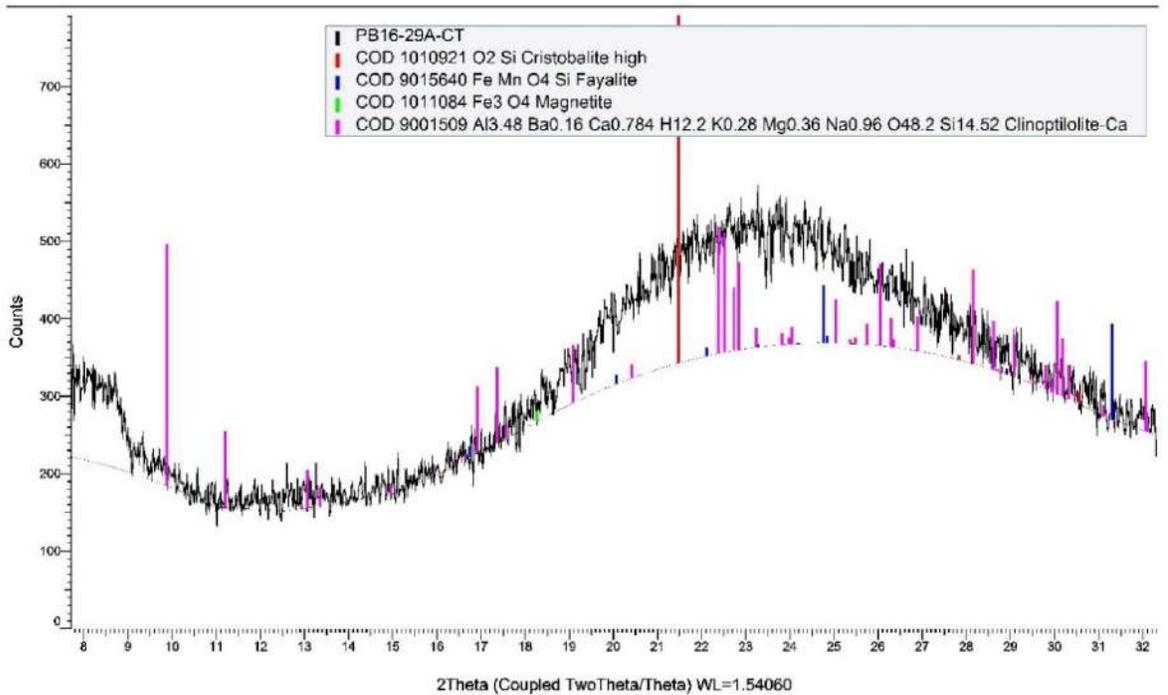


Figura 27. Difractograma de la muestra PB16-29A CT.

## **GEOQUÍMICA**

En este apartado se muestran los resultados de los análisis geoquímicos que fueron realizados a 11 muestras de roca perlítica (*Tabla 1*), las cuales fueron examinadas por el laboratorio ALS-Chemex, bajo los siguientes métodos; (1) Paquete de Roca Total (ICP-AES), (2) Pérdida por Ignición a 1,000°C y (3) Fusión Lithium Borate (ICP-MS). Esto con la finalidad de definir los elementos mayores, elementos traza y elementos de tierras raras (*Tabla 3* en anexos). Para la ilustración de los datos se han recalculado los valores al 100% sin agua. Además, se ha utilizado el software GCDkit para la obtención de los distintos diagramas geoquímicos que se muestran a continuación. De las muestras analizadas la PB16-17 es la brecha perlítica, la PB16-28AB corresponde a gravilla de perlita, y la PB16-13 es una obsidiana.

### **CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LOS MAGMAS FORMADORES**

En la ilustración de los datos bajo el diagrama Total Alkali Silica (TAS, [Le Bas et al., 1986](#)), el grupo de rocas perlíticas se posicionan en el bloque de clasificación riolítica (*Figura 28A*) y la zona subalcalina, además, cuentan con altas cantidades muy uniformes de sílice (~76%) y una muy ligera variación vertical en Sodio y Potasio. La muestra de obsidiana presenta un comportamiento similar en los valores en sílice del grupo, pero valores más elevados de Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O. También se puede apreciar, que la muestra que corresponde a la brecha perlítica se encuentra de sodio y potasio. Tanto las marekanitas, como la brecha perlítica representan los valores más desiguales, con respecto al grupo, de pérdidas por calcinación (LOI). Se observa al grupo (rojo) de muestras con porcentajes cercanos al 4% de pérdidas por ignición con mayor contenido de sodio y potasio, y por la parte de menor contenido de sodio y potasio se observa a los grupos (azul, morado y amarillo) de muestras con mayores contenidos de pérdidas por ignición.

En el diagrama propuesto por [Peccherillo y Taylor \(1976\)](#) que hace la discriminación a las distintas series magmáticas en relación con el sílice y potasio (*Figura 28B*), estas muestras se encuentran en la serie con altos valores de potasio. Podemos observar una

alineación de los datos originada por altos y constantes valores de sílice. Respecto a los altos valores de potasio, se aprecia una ligera variación de los datos, en la que se agrupan los valores de las muestras perlíticas, donde la muestra de gravilla es posicionada al centro de las perlitas, y por debajo de ellas se observan los valores de la marekanita y la brecha perlítica. Este tipo de roca muestra una afinidad magmática que es común en un volcanismo de zonas de margen continental activo. La tendencia de las muestras de perlita con la obsidiana, sugiere que si disminuye el porcentaje de Sílice aumenta el Sodio y Potasio.

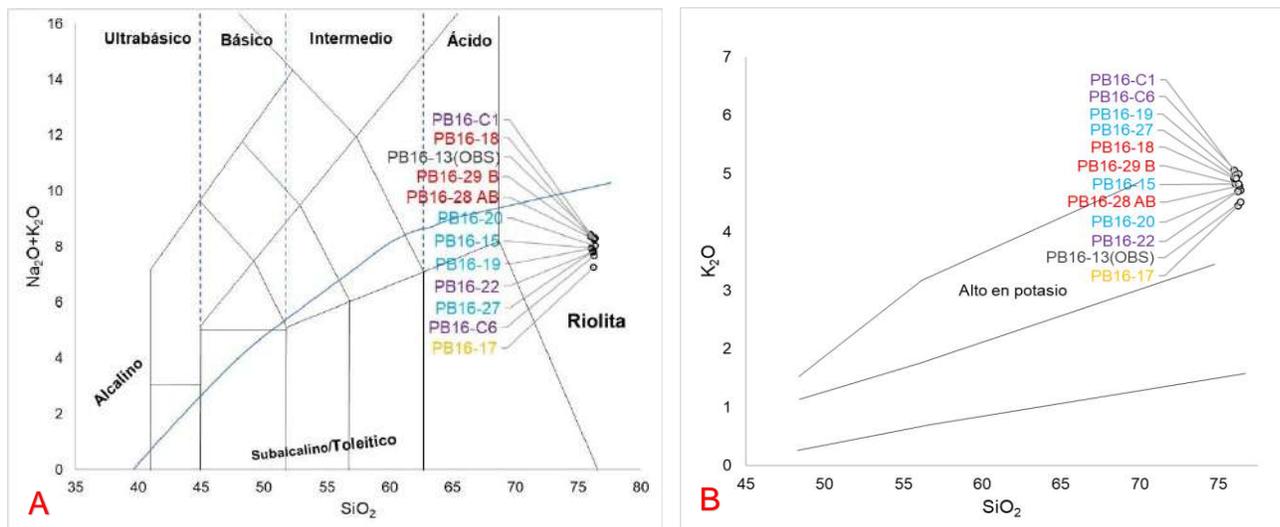


Figura 28. (A) Diagrama de clasificación para rocas volcánicas TAS (Total Alkali vs Silica). (B) Diagrama de variación de Peccerillo y Taylor (1976), que muestra la tendencia en K de las series magmáticas.

En el modelo discriminativo de Miyashiro (1974) que evalúa la variación del hierro sobre el magnesio relacionado al contenido de sílice, se observa (Figura 29) una evolución representada en una alineación vertical de las muestras, en las que los grupos por colores de la relación pérdidas por ignición y densidad expandida tienen una clara organización. Hay que observar que la evolución parte de la obsidiana como la roca representativa de la química magmática original, disminuyendo los valores de la relación hierro/magnesio al incrementar las pérdidas por ignición.

En el campo correspondiente a la serie toleítica encontramos a las muestras con menores porcentajes de pérdidas por calcinación, en cambio, en el campo de la serie calci-

alcalina, a las muestras que contienen los porcentajes más elevados. En la serie toleítica encontramos muestras (representadas en rojo) con aproximadamente 4% de LOI, tres de ellas corresponden al depósito Selene y una al depósito La Bendición y están separadas por aproximadamente 1.5 km longitudinales y 700 metros de altura. Entre las muestras cerca del 4.3% de pérdidas por ignición se encuentra la obsidiana que contiene 0.5% de LOI. En la serie calci-alcalina encontramos las muestras del depósito La Bendición, contienen entre 5.3 y 7.2% de pérdidas por ignición, excepto por la muestra PB16-C6 del depósito Selene. En este diagrama las muestras se organizan de manera vertical obedeciendo al orden del valor de pérdidas por ignición de las muestras, de abajo hacia arriba se ordenan las muestras de mayor a menor porcentaje de pérdidas por calcinación, solamente la obsidiana no obedece este orden, y las muestras PB16-C6 y PB16-17 están invertidas, pero sus pérdidas por ignición difieren solo por 0.01%.

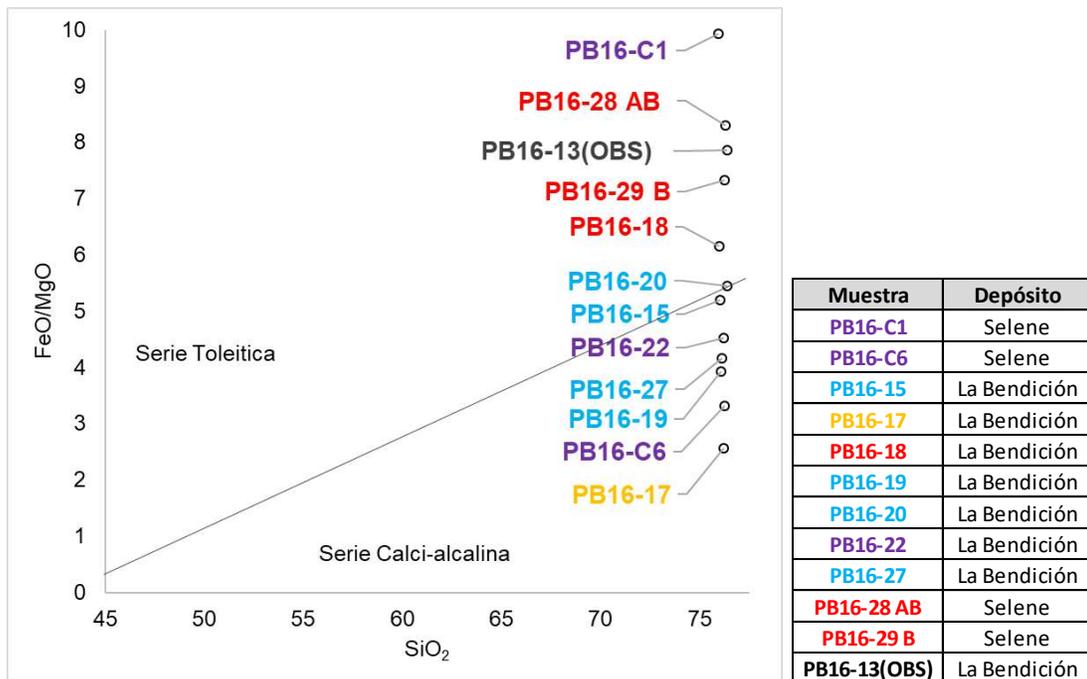


Figura 29. Diagrama discriminador de la serie toleítica y calci-alcalina (Miyashiro, 1974).

## ELEMENTOS TRAZA

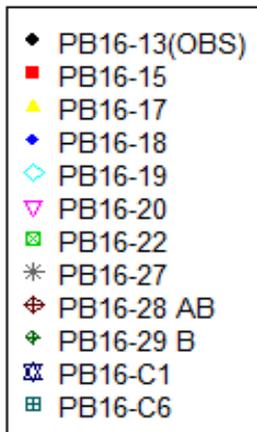


Figura 30. Simbología geoquímica de diagramas multi-elementos.

Las relaciones en las concentraciones de los elementos traza de las perlitas estudiadas pueden ser observadas en el diagrama multi-elementos (Figura 31), en este se presentan pendientes con tendencia negativa y anomalías en decrementos por Niobio (Nb), Fósforo (P) y Titanio (Ti). Las muestras presentan tendencia al paralelismo, excepto por ligeras variaciones en Cesio (Cs) y Estroncio (Sr). En la anomalía positiva por Cs se observa a la brecha perlítica como una con los valores más altos, las muestras perlíticas se distribuyen verticalmente hasta que en la zona con los valores más bajos encontramos a la obsidiana y a la gravilla de perlita. Además, hay que señalar que en la anomalía negativa de Estroncio la muestra con valores más altos es la que corresponde a la brecha perlítica envolvente y, la obsidiana una de las que presenta los valores más bajos, y que en la anomalía de fósforo (P) las muestras con valores más bajos son la brecha perlítica y la obsidiana. Según Sun y McDonough (1989) estas anomalías son características de un arco magmático, de lo cual, serían producto del vulcanismo formado por la subducción de la placa Farallón durante el Oligoceno-Mioceno. La Figura 30 corresponde a la leyenda geoquímica de las rocas.

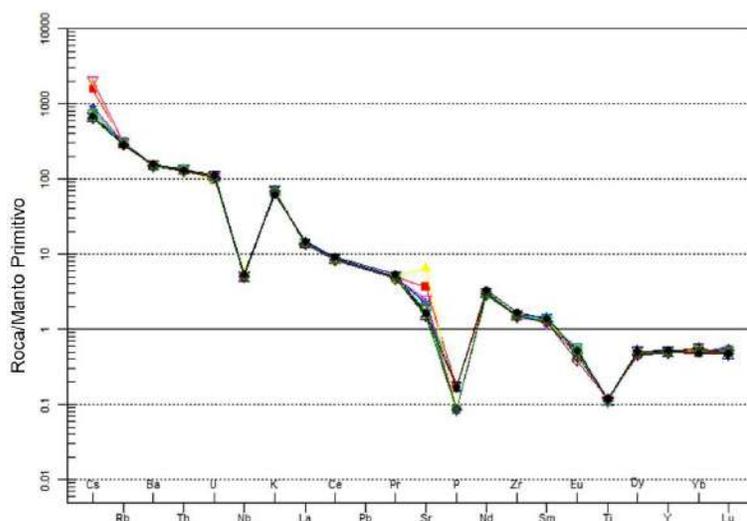


Figura 31. Diagrama multi-elementos normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough., 1989).

## TIERRAS RARAS

En el diagrama de REE (*Figura 32*) normalizadas a condrita se observan pendientes negativas en las REE ligeras y una tendencia a la horizontal en las pesadas. Los datos se agrupan con tendencia paralela de sus espectros, y concuerdan en una anomalía negativa de Europio (Eu), donde en los valores más bajos encontramos la muestra de gravilla de perlita, en los valores medios se observa la brecha perlítica, y entre los valores más altos observamos la obsidiana.

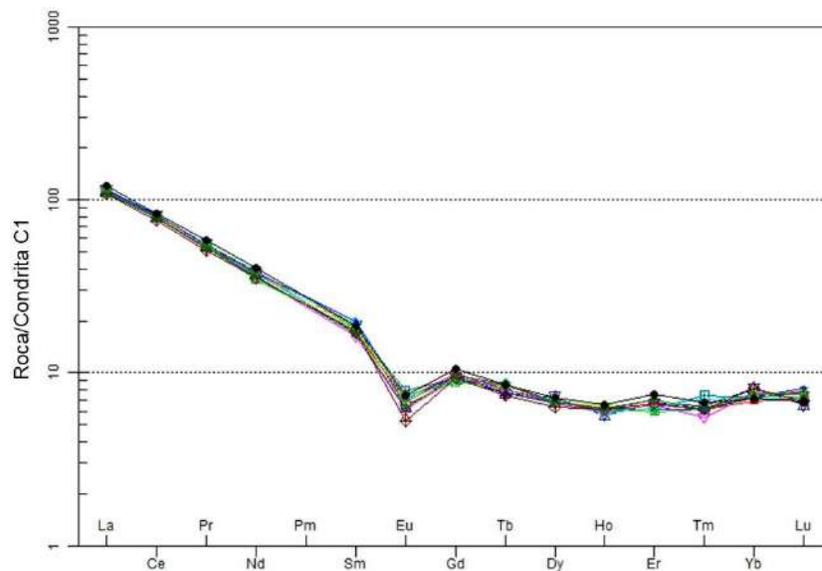


Figura 32. Diagrama multi-elementos de tierras raras normalizadas a condrita (Boynton., 1984).

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LA PERLITA

A diferencia de las obsidianas, la perlita tiene un contenido mayor en agua, producto de una hidratación secundaria. Este contenido de agua es cuantificable, en este caso se lo atribuimos a las pérdidas por ignición (LOI) de las muestras estudiadas, e indica una relación clave con la densidad expandida como un producto del proceso de expansión de la perlita.

## **ELEMENTOS MAYORES**

Estos elementos se ilustran (*Figura 33*) como los diagramas tipo *Harker* (*1909*), solo que en lugar de evaluar los elementos en base a la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), se hizo en relación con las pérdidas por ignición (LOI).

Si recuperamos los grupos organizados en colores basados en la relación densidad expandida y pérdidas por calcinación, del capítulo de expansión, podemos observar que el grupo rojo con las perlitas con valores cercanos al 4.3% en pérdidas por ignición se agrupan de manera puntual cuando los valores del elemento evaluado son muy similares, como en el caso del  $\text{NaO}_2$  y el  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o de manera vertical cuando los valores son más dispersos. Dos de estas tres muestras se encuentran en una posición muy cercana (PB16-28AB y 29B), a unas cuantas decenas de metros, en el depósito Selene, en cambio la muestra PB16-18 se encuentra a casi 1.5 kilómetros, en el depósito La Bendición.

El grupo de muestras representadas en color azul, con valores de pérdidas por ignición entre 5.3 y 6%, casualmente corresponde a muestras del depósito La Bendición, generalmente se encuentran agrupadas verticalmente por su similitud en pérdidas por ignición y varían ligeramente en el eje de las abscisas. En las relaciones de pérdidas por ignición con los elementos  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{TiO}_2$  estas muestras presentan valores de mayor similitud.

La muestra de la brecha perlítica (PB16-17) representada en color amarillo corresponde al depósito La Bendición, y en ocasiones la observamos agrupada o alineada a las muestras representadas por el grupo azul, esto probablemente por las cercanías y por pertenecer al mismo depósito.

De las tres muestras representadas en color morado, dos (PB16-C1 y C6) corresponden al depósito Selene y una (PB16-22) al depósito La Bendición, generalmente se les ve dispersas en los diagramas, pero suelen formar lineaciones, en las que incluso en ocasiones se agrupan a las muestras representadas en azul.

La muestra de la obsidiana (PB16-13) generalmente se encuentra aislada, esto porque al no haber sufrido una hidratación secundaria la proporción de sus elementos difiere de las perlitas, y tiene valores más bajos de pérdidas por ignición.

Caracterización petrológica y origen de los yacimientos de perlita en Babidanchi, NE de Sonora, México: Implicaciones geoquímicas e interdependencia de variables en su expansión. Melgarejo-Joris E. 2019

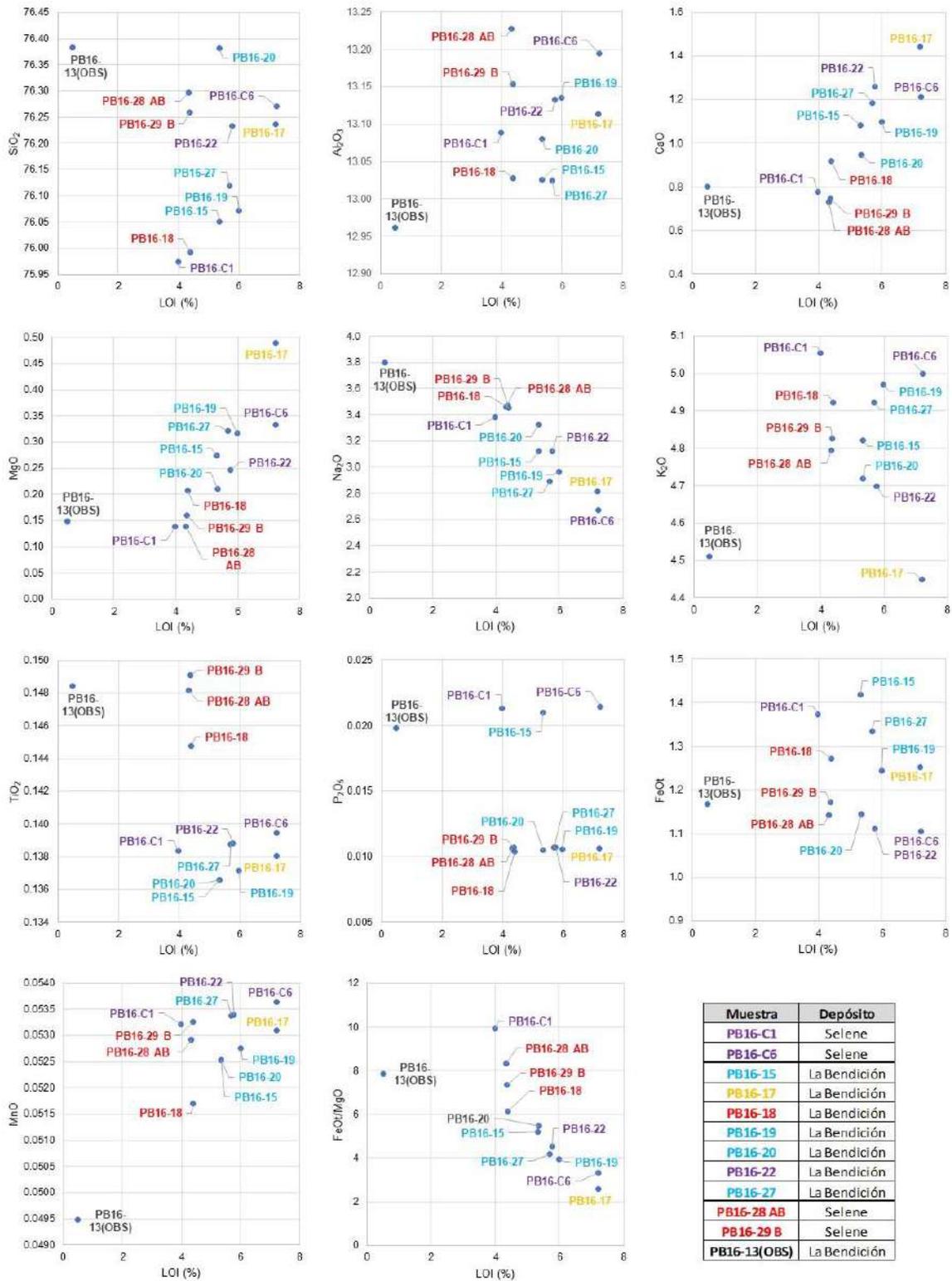


Figura 33. Diagramas tipo Harker (1909): relación entre LOI vs Elementos mayores.

## DIFERENCIACIÓN DEL MAGNESIO

Las primeras observaciones de la diferenciación del Magnesio se realizaron en diagramas binarios, relacionando la evolución del Magnesio con las pérdidas por ignición. Para obtener los valores de la evolución del Magnesio (Mg#; Moore, 1988) se realiza el siguiente cálculo en relación con el hierro (Fe) que contienen las muestras:

$$Mg\# = \frac{Mg}{(Fe + Mg)} * 100$$

Moore en 1988 usa este coeficiente para diferenciar rocas derivadas de magmas provenientes de distintas profundidades del manto, mientras que en nuestro caso, al comparar este coeficiente en función de la pérdida por ignición (LOI), se puede ver que se asocian (Figura 34). En el diagrama de diferenciación Mg# se observa a la obsidiana aislada (Figura 34A) en los valores mínimos de pérdidas por ignición, y está entre las muestras con menores proporciones de Mg#. Las muestras de perlita se agrupan en una tendencia lineal (Figura 34B) con pendiente positiva, que sugiere que al aumentar las pérdidas por ignición aumenta el contenido de Magnesio con respecto a Hierro, además se observa que el coeficiente de correlación "R" tiene un valor cercano a uno que indica estadísticamente que la tendencia se ajusta a la ecuación.

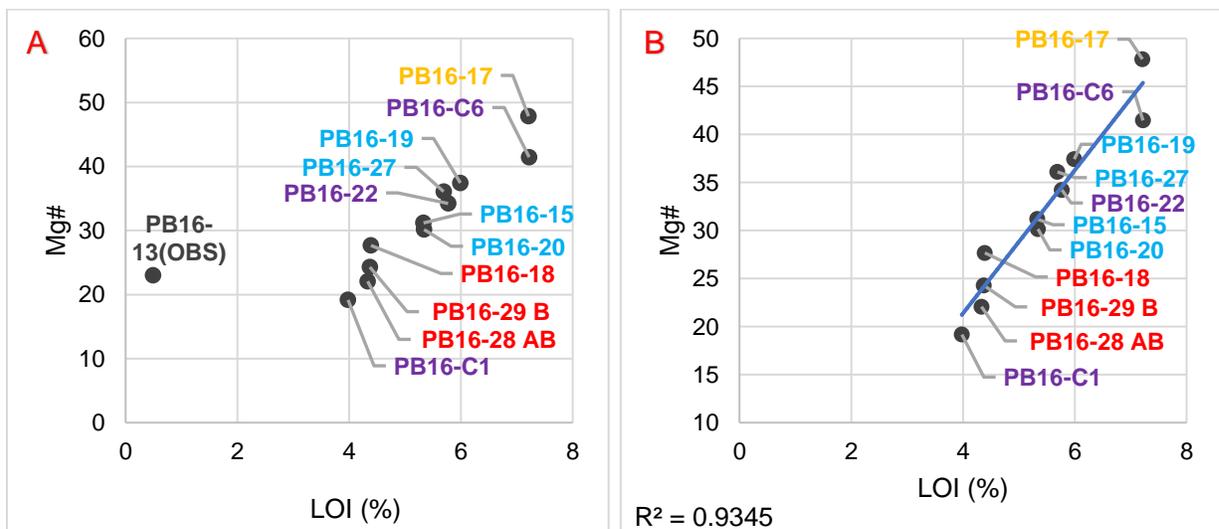


Figura 34. (A) Relación de pérdidas por ignición contra diferenciación del magnesio, y (B) tendencia de diferenciación de perlitas.

## **ELEMENTOS MAYORES DE LA PERLITA NORMALIZADOS A OBSIDIANA**

En el diagrama multi-elementos de la *figura 35* se representan las proporciones de los valores de los elementos mayores y menores normalizados con los valores de la obsidiana. Los diagramas multi-elementos normalizados con los valores de la obsidiana muestran diferencias en contenido de sus elementos, algunos de ellos, al tener valores mayores que el contenido de la obsidiana, se colocan en posiciones por encima de la unidad, en cambio, los elementos que se encuentran en menor proporción a la obsidiana se encuentran por debajo de la unidad. En los elementos mayores se presentan también los valores de las pérdidas por calcinación, normalizadas a los valores de la obsidiana, ya que el evento secundario que propició la hidratación del magma riolítico tiene una implicación en la química de la roca resultante.

Las muestras en general tienen valores muy similares de Sílice, Aluminio y Manganeso. Los valores de sílice tienen valores de 0.998, el Aluminio 1.01 y el Manganeso desde 1.044 a 1.084, el Fosforo tiende a dos posibles valores, en el que algunas muestras tienden a la unidad y otras a valores cercanos a 0.5, y además el orden de los valores en LOI es congruente con el orden de los valores de Magnesio y Sodio. Las anomalías de mayor valor son las de Magnesio, que van desde 0.926 hasta 3.291 veces más que el valor que contiene la obsidiana. El Hierro presenta anomalías que varían desde 0.978 hasta 1.214, en el potasio de 0.986 a 1.120, y el titanio de 0.920 a 1.004. El único elemento que presentó anomalías inferiores a las de la obsidiana en todas sus muestras fue el sodio, éstas tienen valores que van desde 0.703 a 0.913.

De las muestras (PB16-18, 28AB, 29B) con pérdidas por ignición con 4.3% y expansiones a densidades de  $\sim 21.5 \text{ kg/m}^3$ , tienen en general valores que hacen que el diagrama (*Figura 36*) tienda más a la horizontalidad, esto porque sus valores son más similares a la obsidiana. En el caso de la PB6-28AB se observan valores en Hierro de 0.978, Calcio de 0.911, Magnesio de 0.926 y Fosforo 0.534. La muestra PB16-29B presenta valores de Hierro de 1.003, Calcio de 0.930, Magnesio de 1.076 y Fosforo 0.538. La muestra PB16-18 tiene valores de Hierro de 1.089, Calcio de 1.148, Magnesio de 1.393 y Fosforo 0.522. Las tres muestras son concordantes en el resto de los elementos del diagrama, en el caso

del sodio tienen valores de muy cercanos a 0.91, en Potasio a 1.07, en el Titanio y Manganeso los valores son muy cercanos a la unidad.

De las muestras (PB16-15, 19, 20, 27) con valores por pérdidas por ignición entre el 5.3 y 6% y densidades expandidas de 25 a 30 kg/m<sup>3</sup>, se observa en la *figura 37*, la PB16-20 tiene valores de 0.98 en Hierro, Calcio de 1.17, Magnesio de 1.415, Sodio con 0.87 y Fosforo de 0.53. La muestra PB16-15 tiene valores de 1.214 en Hierro, Calcio de 1.35, Magnesio de 1.84, Sodio con 0.82 y Fosforo de 1.061. La muestra PB16-19 tiene valores de 1.066 en Hierro, Calcio de 1.369, Magnesio de 2.132, Sodio con 0.78 y Fosforo de 0.533. La muestra PB16-27 tiene valores de 1.143 en Hierro, Calcio de 1.478, Magnesio de 2.158, Sodio con 0.761 y Fosforo de 0.539.

En las muestras (PB16-C1, 22, C6) con densidades expandidas entre 32 y 45 kg/m<sup>3</sup> y LOI entre 3.98 y 7.22% se ilustran en la *figura 38*. La muestra PB16-C1 tiene valores de 1.175 en Hierro, Calcio de 0.969, Magnesio de 0.932, Sodio con 0.89 y Fosforo de 1.07. La muestra PB16-22 tiene valores de 0.951 en hierro, Calcio de 1.572, Magnesio de 1.654, Sodio con 0.82 y Fosforo 0.539. La muestra PB16-C6 tiene valores de 0.946 en Hierro, Calcio de 1.512, Magnesio de 2.24, Sodio con 0.703 y Fosforo de 1.084. La muestra brechoide (PB16-17) tiene un LOI de 7.21% y una densidad expandida de 28 kg/m<sup>3</sup>, tiene valores de 1.073 en Hierro, Calcio de 1.801, Magnesio de 3.291, Sodio con 0.74 y Fosforo de 0.536. De todas las muestras analizadas, ésta es la que tiene valores superiores en pérdidas por ignición, en valores mayores en magnesio y menores en potasio.

El Magnesio es un elemento móvil de concentraciones variables en la hidrosfera, y es uno de los elementos mayores en agua dulce. Tanto su concentración como su composición isotópica es muy variable en la hidrosfera, y es importante conocer su ciclo para comprender el comportamiento de los isotopos de Magnesio durante la meteorización continental (*Fang-Zhen Teng, 2017*).

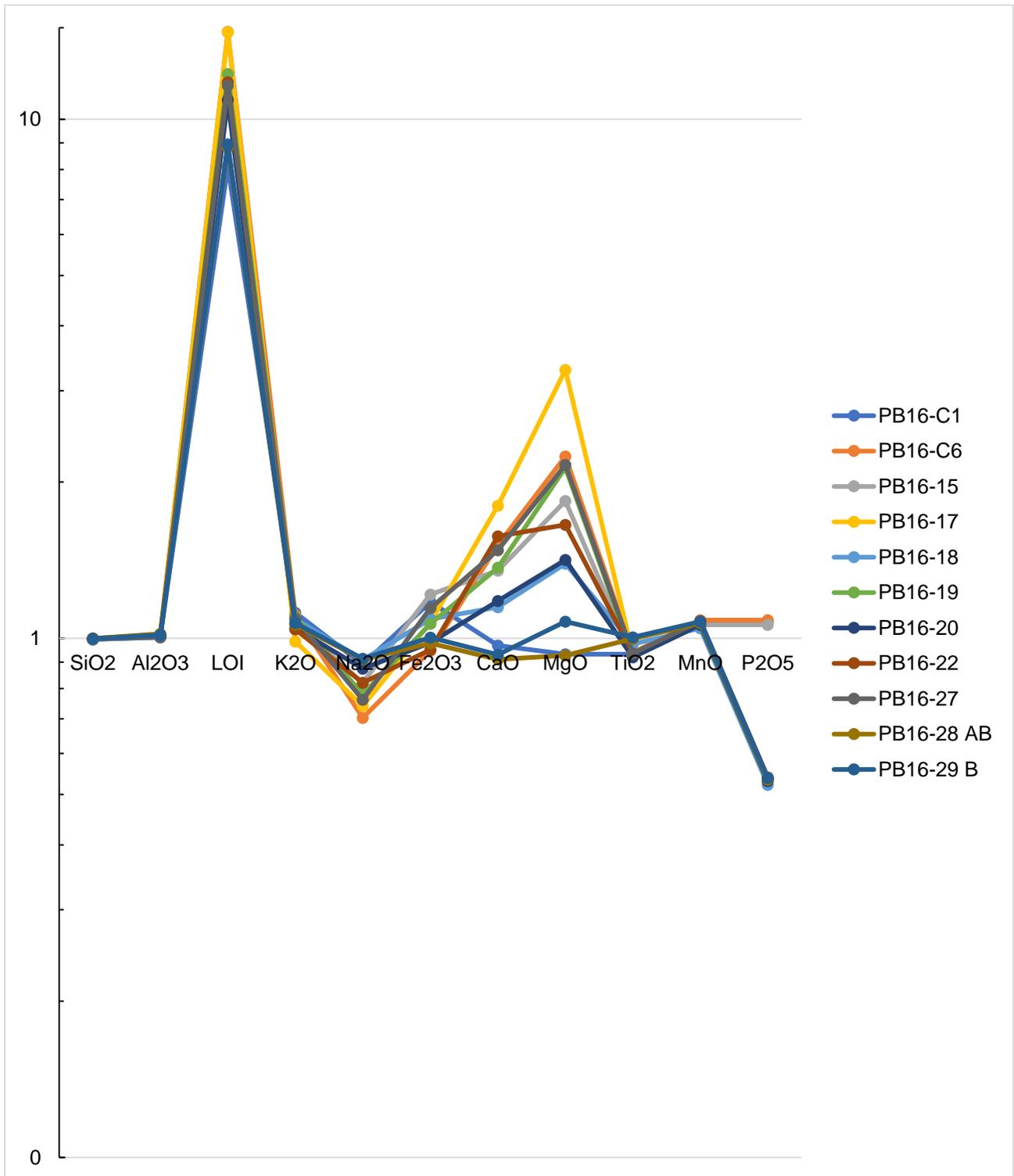


Figura 35. Diagrama multi-elementos de perlitas normalizadas a los valores de la obsidiana. El acomodo de los elementos está en función de su concentración de mayor a menor en las muestras.

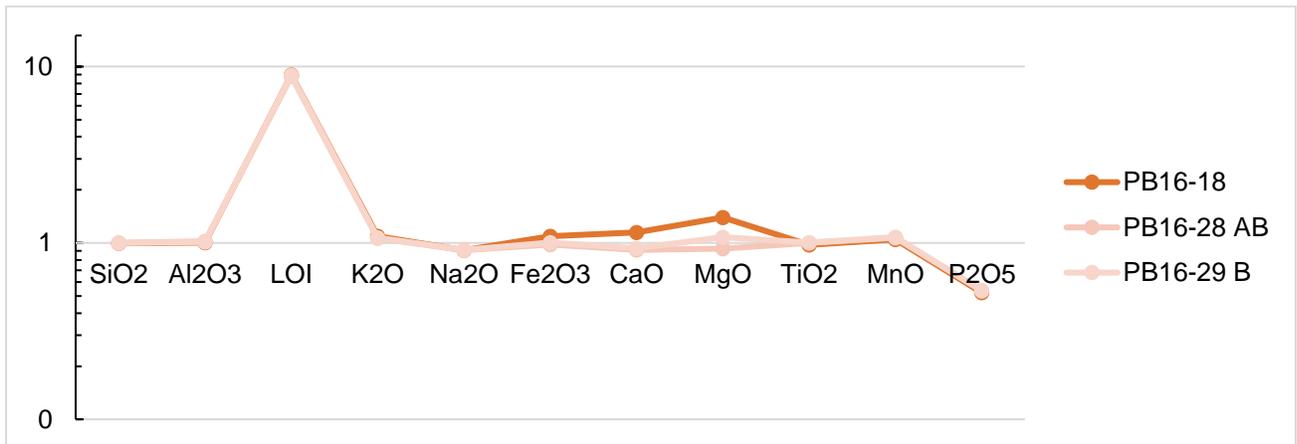


Figura 36. Muestras con pérdidas por ignición con 4.3% y expansiones a densidades de ~21.5 kg/m<sup>3</sup>.

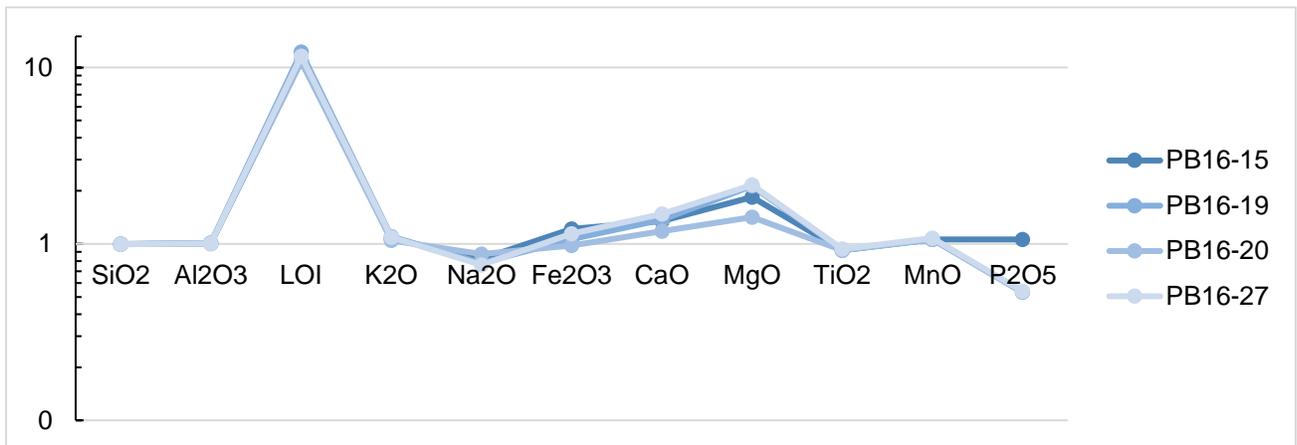


Figura 37. Muestras con valores por pérdidas por ignición entre el 5.3 y 6% y expansiones a densidades de 25-30 kg/m<sup>3</sup>.

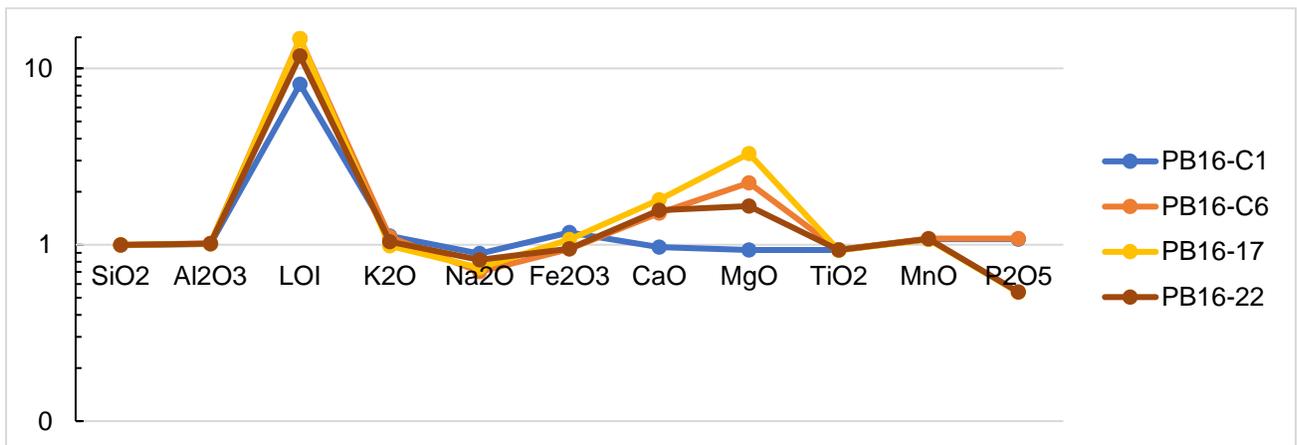


Figura 38. Muestras con expansiones entre 32-45 kg/m<sup>3</sup> y LOI entre 3.98 y 7.22%.

## **ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS**

En la relación de estos elementos con la pérdida por ignición (*Figura 39*), y representados por los grupos formados por la relación de pérdidas por ignición y densidad expandida, las muestras del grupo en rojo se presentan comúnmente como lineaciones que tienden a la vertical, excepto en la relación con el  $K_2O/Na_2O$ , agrupándose de manera puntual, ya que sus valores en las abscisas y ordenadas son muy similares. En este mismo diagrama y en el de la relación con la alcalinidad ( $A/CNK$ ), los cuatro grupos de muestras presentan una tendencia que indica que, a mayor cantidad de pérdidas por ignición, los valores de estos elementos aumentan.

El grupo de muestras representadas en color azul se agrupan de manera vertical con ligeras variaciones en el eje de las abscisas. Este grupo tiende a organizarse con la muestra PB16-22 de otro grupo, esto debido a que, aunque no comparte la misma densidad expandida, comparte propiedades químicas, ya que geográficamente, están posicionadas a pocas centenas de metros. Las muestras representadas por el grupo de color morado se encuentran generalmente dispersas, ya que tienden a organizarse con muestras de otros grupos, esto debido a que este grupo se formó por ser el de densidades mayores al expandir, pero químicamente comparte características de las distintas muestras.

La obsidiana (PB16-13) y la brecha perlítica (PB16-17) tienden a aislarse a sentidos opuestos de los diagramas, esto debido a que poseen los extremos en proporciones de cantidad de  $H_2O$ , sus demás elementos se ven afectados en proporción, aun así, en ciertos casos se agrupan a las tendencias de las muestras.

El diagrama de relación a alcalinidad se evaluó contra pérdidas por ignición y proporción de Sílice, y en ambos se aprecia una tendencia a aumentar la alcalinidad mientras los valores de las abscisas aumentan. La relación potasio/sodio también fue evaluada contra las pérdidas por ignición y el porcentaje en Sílice, muestra tendencias que indican que cuando las pérdidas por ignición aumentan, la relación Potasio/Sodio también, en cambio al evaluar los datos contra sílice se observa que mientras este aumenta la relación sodio/potasio disminuye.

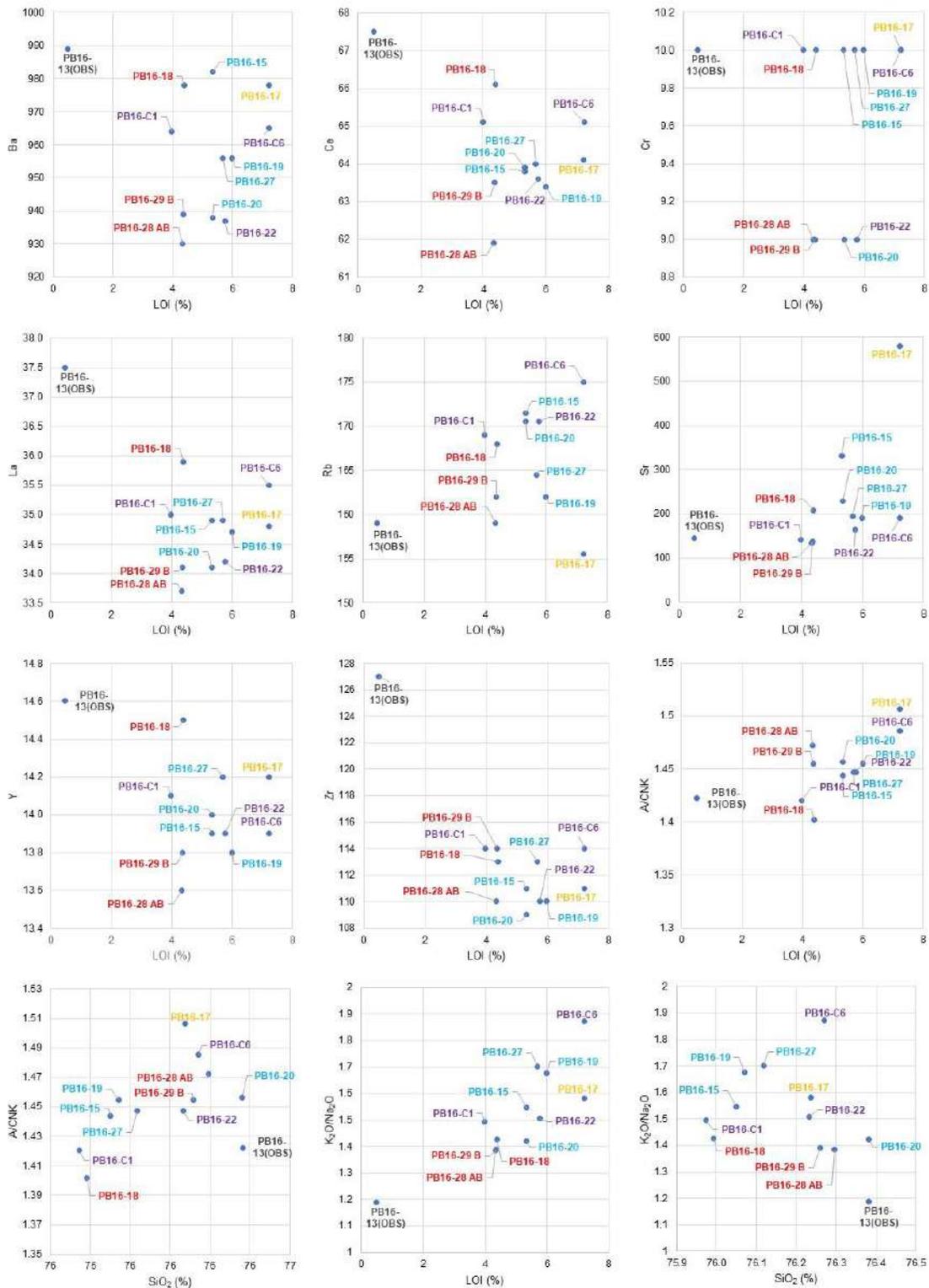


Figura 39. Diagramas tipo Harker (1909) presentando la relación LOI contra Elementos traza.

## **ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS NORMALIADAS A OBSIDIANA**

En el diagrama (*Figura 40*) multi-elementos normalizado con los valores de la obsidiana se representan los elementos traza normalizados con los valores de la obsidiana. En lo general se observa que las anomalías más positivas son en Cesio(Cs) y Estroncio (Sr), otros elementos como el Erbio (Er), Europio (Eu), Lutecio (Lu), Rubidio (Rb), Tulio (Tm) e Iterbio (Yb), presentan valores con un rango de variación moderado, además de algunos como el Bario (Ba), Cerio (Ce), Galio (Ga), Lantano (La), etc. son de valores más similares. En Cesio podemos ver valores que van desde 0.923 veces la obsidiana, hasta 3 veces mayor a ella, y Estroncio desde 0.91 veces el valor de la obsidiana, hasta el equivalente de 3.986 veces.

Del grupo de muestras (*Figura 41*) con densidades expandidas de  $\sim 21.5 \text{ kg/m}^3$  y LOI de 4.3% se observa que la mayoría de los elementos se encuentra por debajo de los valores de la obsidiana. En el caso de la muestra PB16-18 sus valores son ligeramente menores a la obsidiana en Bario y Cerio por pocos decimales, en el caso del Cesio tiene valores de 1.318, Erbio con 0.828, Europio de 0.962, Lutecio 1.181, Niobio tiene el mismo valor que la obsidiana, el Estroncio tiene 1.422 y en Tulio equivale a 0.909. La muestra PB-28AB tiene una tendencia a la horizontalidad en el diagrama multi-elementos, esto debido a que sus valores son en su mayoría son cercanos a 0.9, el elemento con una anomalía más inferior es el Europio con valor de 0.722, y en el caso del Iterbio con 1.149 es el de mayor valor. En el diagrama muestra PB16-29B tiende a la horizontalidad por que los valores de sus elementos tienden a ser ligeramente menores que los de la obsidiana, generalmente se encuentran con un valor cercano a 0.9, en el que el elemento de menor proporción es el Europio con valor de 0.851, y el Lutecio es el de mayor proporción con un valor de 1.136.

Las muestras (PB16-15, 19, 20, 27) con valores por pérdidas por ignición entre el 5.3 y 6% y expansiones a densidades de 25 a  $30 \text{ kg/m}^3$  presentan en lo general valores cercanos a la unidad, que hacen que los diagramas (*Figura 42*) multi-elementos tiendan a la horizontal, esto a excepción del Cesio y el Estroncio. Los valores superiores en la muestra PB16-15 corresponden al Cesio con 2.245 y al Estroncio con 2.274, el resto de los elementos presentan valores muy cercanos a la unidad, que van desde 0.872 en el caso del Erbio,

hasta un valor de 1.083 en el Galio. Para la muestra PB16-19 observamos valores muy cercanos a la unidad, a excepción del Estroncio con un valor de 1.305. El Erbio es el de valor más bajo con 0.834, pero la tendencia en los elementos de esta muestra es de 0.9 a ligeras variaciones superiores a la unidad. La muestra PB16-20 en lo general presenta valores muy cercanos a la unidad lo que hace tender al gráfico a la horizontalidad, a excepción del Cesio con valor de 3.004, y el Estroncio con 1.567. Elementos como el Bario, Cesio, Erbio, Europio, Lantano, Neodimio, Samario, Tántalo e Itrio, se encuentran por debajo de la unidad, en cambio el Galio, Lutecio, Rubidio e Iterbio, se encuentran ligeramente por encima de la unidad. La mayoría de los elementos traza, como el Bario, Cerio, Disprosio, Erbio, Europio, Lantano, Niobio, Neodimio, Samario y Tulio, de la muestra PB16-27 se encuentran por debajo de la unidad, los elementos con valores más elevados son el Cesio con 1.203 y Estroncio con 1.336, y los elementos con valores ligeramente superiores a la unidad son el Galio, Lutecio, Rubidio, Torio e Iterbio.

En las muestras (PB16-C1, 22, C6) con expansiones entre 32 y 45 kg/m<sup>3</sup> y LOI entre 3.98 y 7.22% se observa (*Figura 43*) en lo general un comportamiento que tiende a la horizontal y tienen los valores menores de Cesio y Estroncio. La muestra PB16-C1 tiene valores de Cesio de 0.979 y Estroncio 0.965, los elementos con mayor contenido son el Galio con valor de 1.083 y el Rubidio con 1.062, el resto de los elementos de varían cerca del valor 0.9, y el samario tiene valor de 1. La muestra PB16-22 presenta en sus valores los más elevados en Cesio con 1.101 y en Estroncio con 1.127, el Iterbio tiene un valor de 1.081 y el Galio con valor de 1.069. El resto de sus elementos se encuentra con valores cercanos a 0.9, y el de menor cantidad es el Erbio con 0.802. El elemento con mayor valor de la muestra PB16-C6 es el Estroncio con 1.309, elementos como el Cesio, Europio, Galio, Lutecio, Rubidio, Tantalio, Torio, Tulio e Iterbio, tienen valores que están ligeramente por encima de la unidad, elementos como el Bario, Cerio, Disprosio, Hafnio, Holmio, Lantano, Niobio, Neodimio, Samario, Terbio e Itrio, tienen valores ligeramente inferiores a la unidad, y el de menor valor es el Erbio. La muestra brechoide (PB16-17) tiene un LOI de 7.21% y una expansión de 28 kg/m<sup>3</sup> tiene el valor más elevado en Estroncio con 3.986 y el segundo más elevado en Cesio con 2.817, tiene un valor de Lutecio de 1.136 y el Iterbio tiene un valor de 1.088. Elementos como el Bario, Cerio, Hafnio, Lantano, Neodimio, Rubidio,

Samario, Talio, Torio, Tulio e Itrio, tienen valores muy cercanos a 0.9, y los elementos más bajos son el Uranio con 0.859 y el Erblio con 0.828.

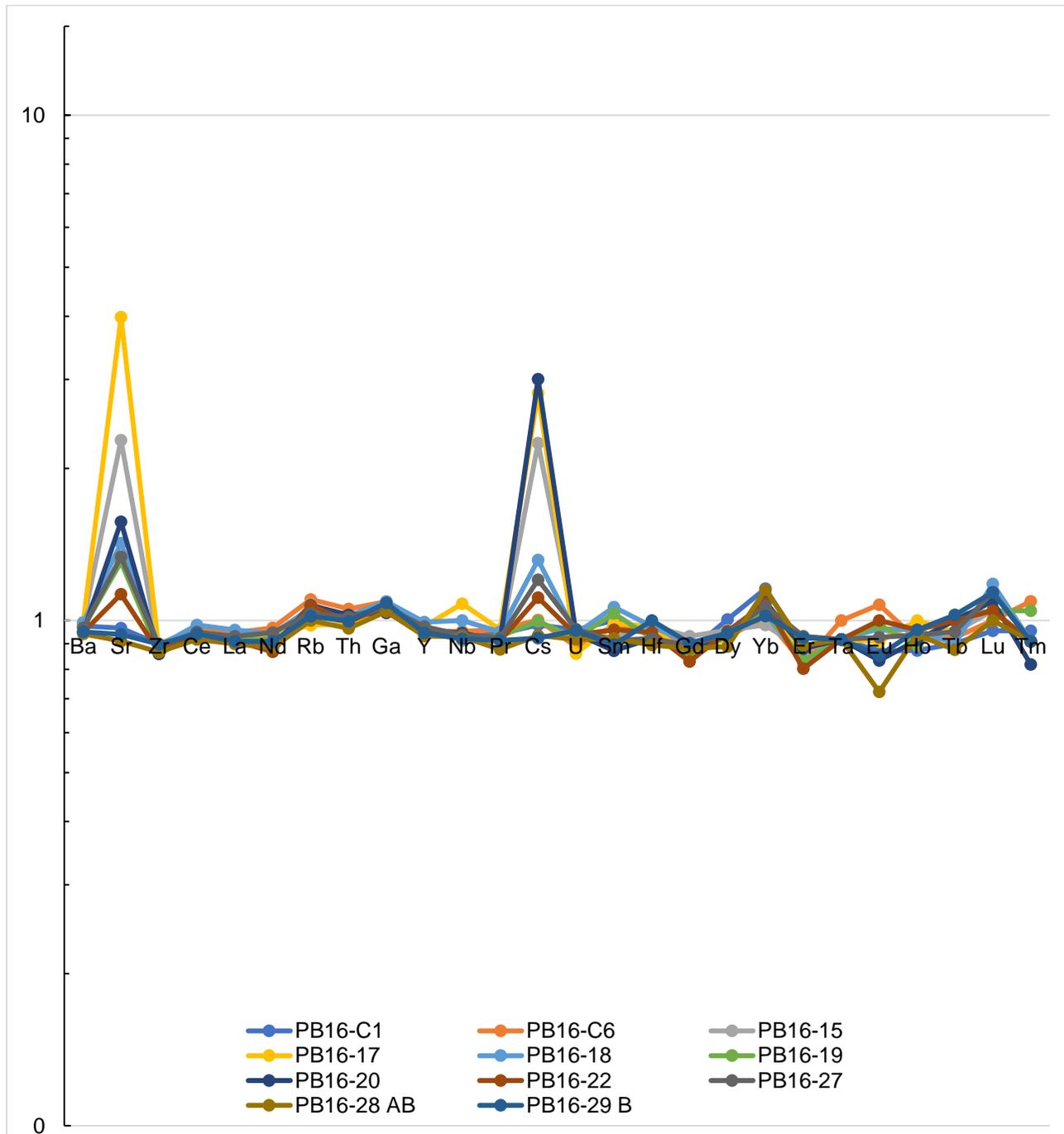


Figura 40. Diagrama multi-elementos normalizado con los valores de la obsidiana. El acomodo de los elementos está en función de su concentración de mayor a menor en las muestras.

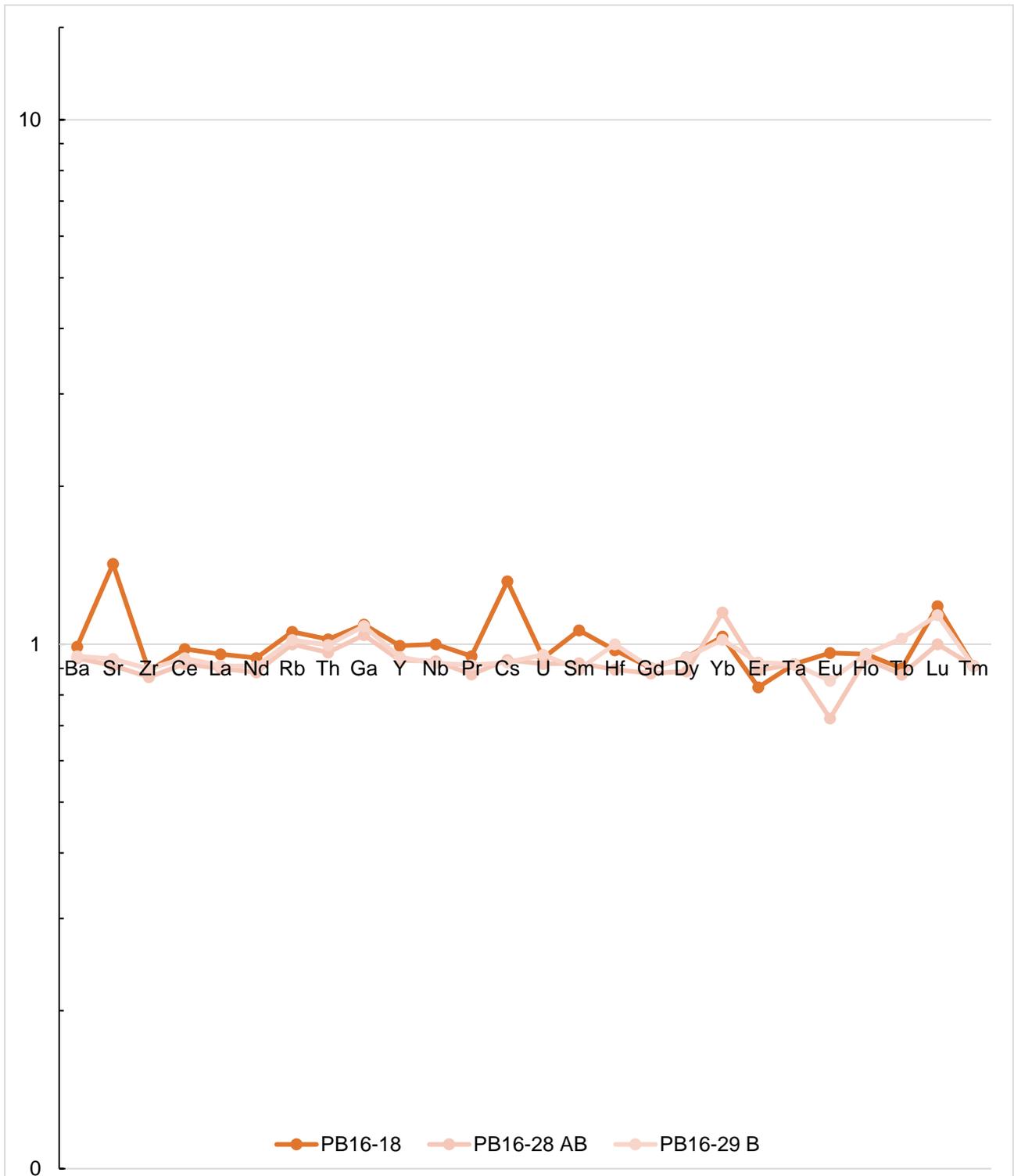


Figura 41. Multi-elementos de las muestras con densidades expandidas de  $\sim 21.5 \text{ kg/m}^3$  y LOI de 4.3%.

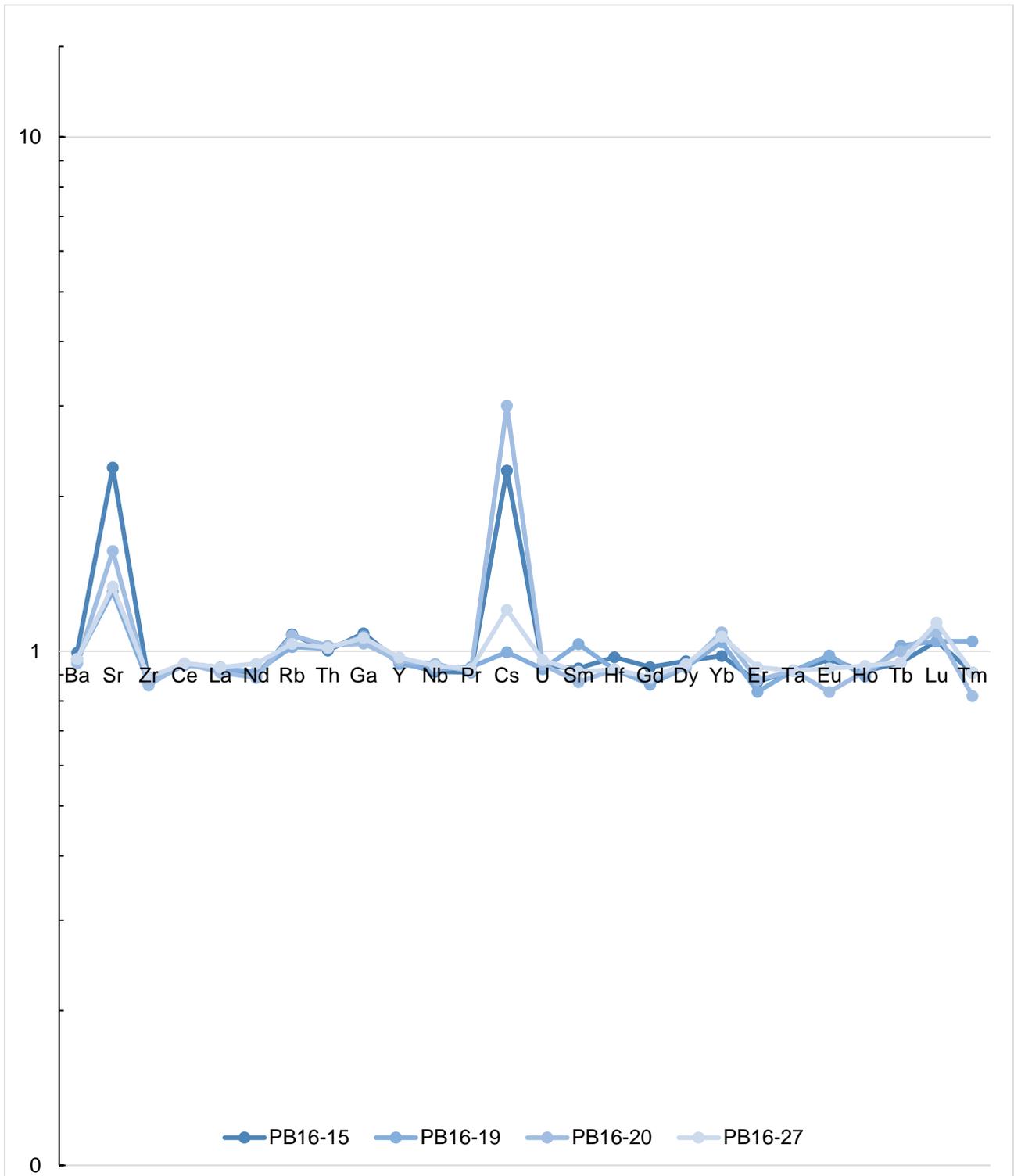


Figura 42. Muestras con valores por pérdidas por ignición entre el 5.3 y 6% y expansiones a densidades de 25-30 kg/m<sup>3</sup>.

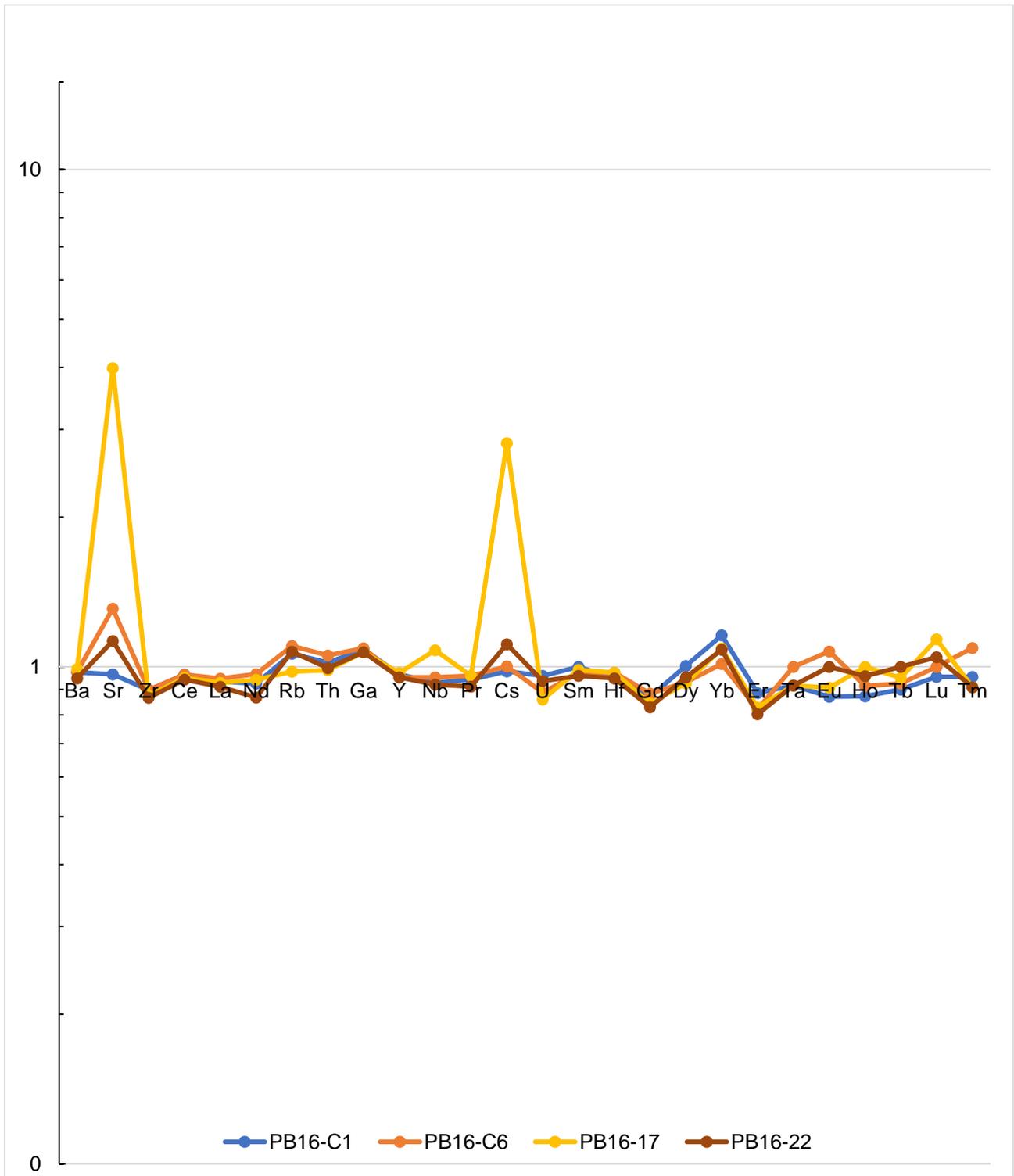


Figura 43. Muestras con expansiones entre 32-45 kg/m<sup>3</sup> y LOI entre 3.98-7.22%.

## INDICE DE ALTERACIÓN

Los índices de alteración generalmente son relaciones normalizadas de datos, se suelen expresar en porcentajes, partes por millón, etc. Suelen usarse para facilitar la discriminación de tipos de alteración y cuantificar su intensidad de alteración. Estos índices pueden ser usados para relacionar cambios mineralógicos de una o distintas facies minerales. *Cathryn Gifkins et al. (2005)* diseñaron una medida de alteración de clorita asociada a depósitos Kuroko-VHMS, ya que era de gran utilidad en los casos que la plagioclasa alterada de sistemas hidrotermales.

En este caso se considera a la obsidiana como la roca original sin alteración o modificación, y se puede apreciar en la *figura 44* que se encuentra al margen, por debajo de la tendencia. Este índice se realizó comparando los valores del índice de alteración en el eje de las abscisas y las pérdidas por calcinación en el eje de las ordenadas. Este índice propuesto por *Ishikawa et al. (1976)* contempla el siguiente cálculo:

$$Al = \frac{100(MgO + K_2O)}{MgO + K_2O + CaO + Na_2O}$$

En el caso de nuestras muestras podemos observar una tendencia a incrementar el índice de alteración conforme incrementan las pérdidas por calcinación, pero no se observa una relación clara con las pérdidas por ignición, ya que las muestras se encuentran algo dispersas, además se obtuvo un coeficiente de Pearson que indica que no hay un buen ajuste a la tendencia. En la *figura 44* se observan las muestras de menor LOI y similar densidad de expansión (PB16-18, 28AB, 29B) agrupadas en valores cercanos al 54% en índice de alteración, la muestra brechoide (PB16-17) se encuentra por encima de la tendencia, el grupo de muestras representadas en azul aumentan su índice de alteración según aumenta las pérdidas por ignición (LOI), las muestras del grupo representadas en color morado se observan algo dispersas.

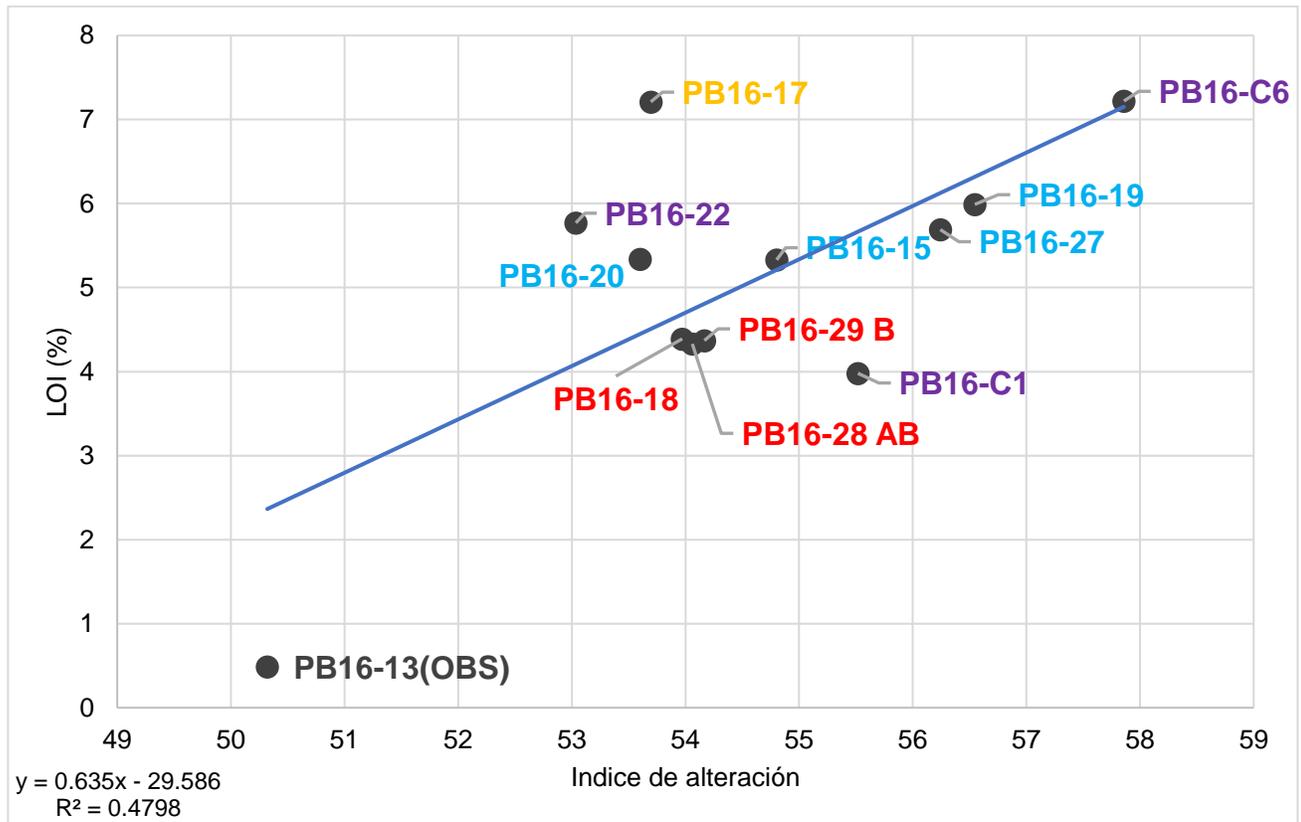


Figura 44. Relación de índice de alteración contra pérdidas por ignición.

## EXPANSIÓN

Las pruebas de expansión se realizaron en laboratorios y hornos de perlita de la oficina de geología y recursos naturales de Nuevo México (*New Mexico Bureau of Geology & Mineral Resources*) en la división del instituto de minería y tecnología (*A Division of New Mexico Institute of Mining & Technology*). Las perlitas se expandieron a 1,300°F (+/- 22°F) o 704°C (+/- 5.5°C) en un *horno sin precalentamiento utilizando muestras menores a la malla 50 (297 µm) y retenidas en la malla 100 (149 µm)*. Los datos de la prueba se presentan en porcentajes de muestra retenida por cada tamiz en los distintos tamaños de malla y se comparan con los valores referencia de la perlita Socorro (*Tabla 2 en Anexos*). Esta comparación con los valores de referencia de la perlita Socorro se muestran a continuación en dos gráficos lineales.

En las *Figura 45 y 46* se observan gráficos que presentan datos porcentuales al eje de las ordenadas y número de malla granulométrica en el eje de las abscisas. En la *Figura 45* se presentan las muestras que presentan mayor porcentaje de retenidos en la malla #50 (297 µm) que la referencia Socorro, tamaño de partícula de mayor abundancia como producto de la expansión. En la *Figura 46* se representan las muestras que tienen menor porcentaje de partículas retenidas en la malla #50 (297 µm) que la referencia Socorro.

En la *Figura 28* se aprecia que en la malla #20 (841 µm) y #30 (595 µm) los valores de las muestras se encuentran por debajo de la referencia Socorro, y la superan en la malla #50 (297 µm), y se mantienen por sobre ella en las mallas de granulometrías más finas las muestras PB16-19, 20 y C6. En la *Figura 29* se observa que de las muestras que tienen menor porcentaje de partículas retenidas en la malla #50 (297 µm) que la referencia Socorro, la muestra PB16-29A se encuentra por encima de la referencia en cuanto a partículas retenidas en la malla #30 (595 µm), y la PB16-17 tiene una cantidad superior de retenidos en las mallas #70 (210 µm) y #100 (149 µm). A partir del pico en la malla #50 (297 µm) y en mallas más finas, las muestras de la perlita Babidanchi tienen un comportamiento muy similar a la perlita de la referencia Socorro, exceptuando la muestra de la brecha

envolvente, ya que se encuentra en valores superiores cercanos al 10% con respecto a la referencia Socorro.

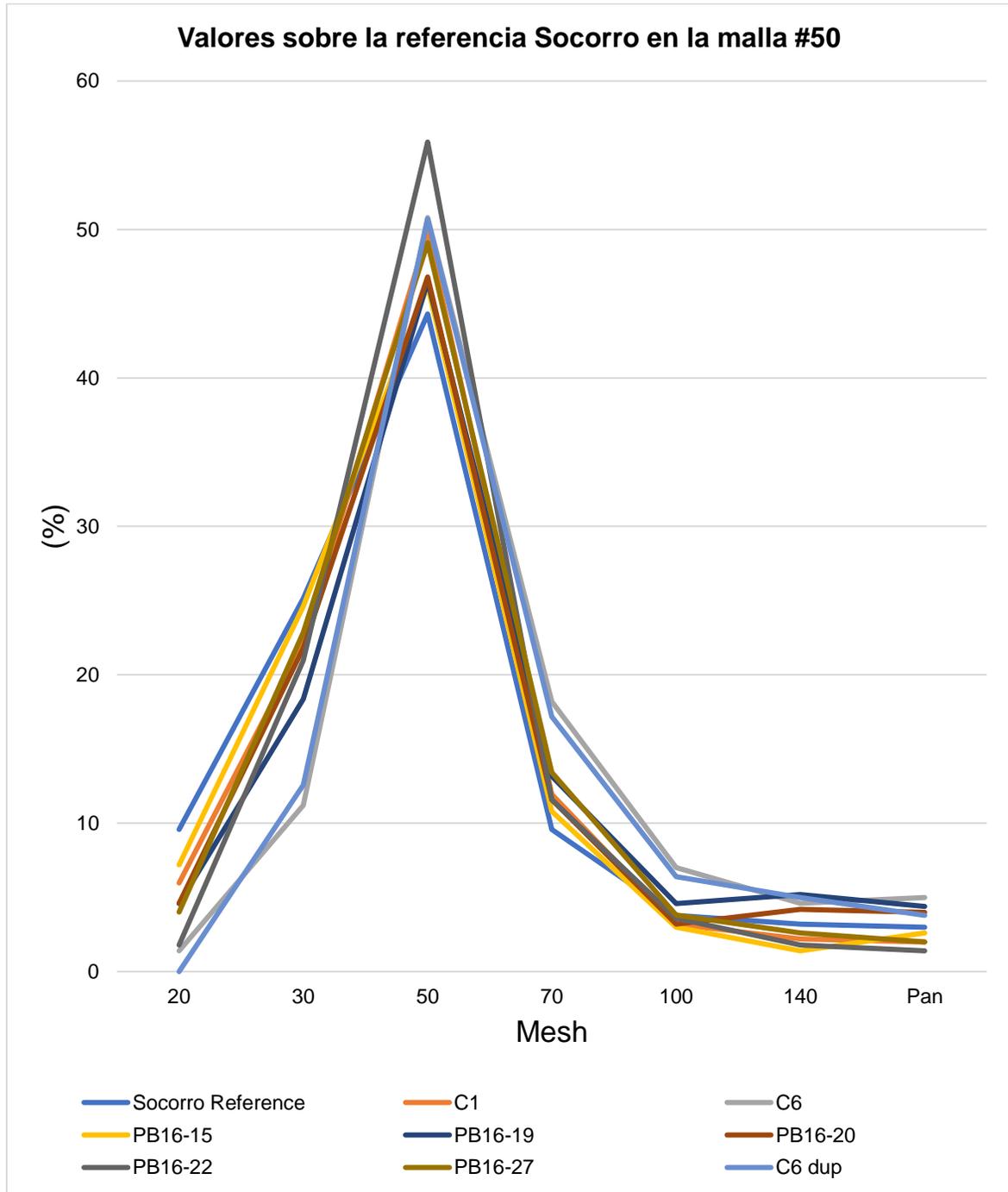


Figura 45. Comparación de los valores de expansión de la perlita Babidanchi que están por encima de la referencia de la mina Socorro en el porcentaje retenido en la malla 50 (297  $\mu\text{m}$ ).

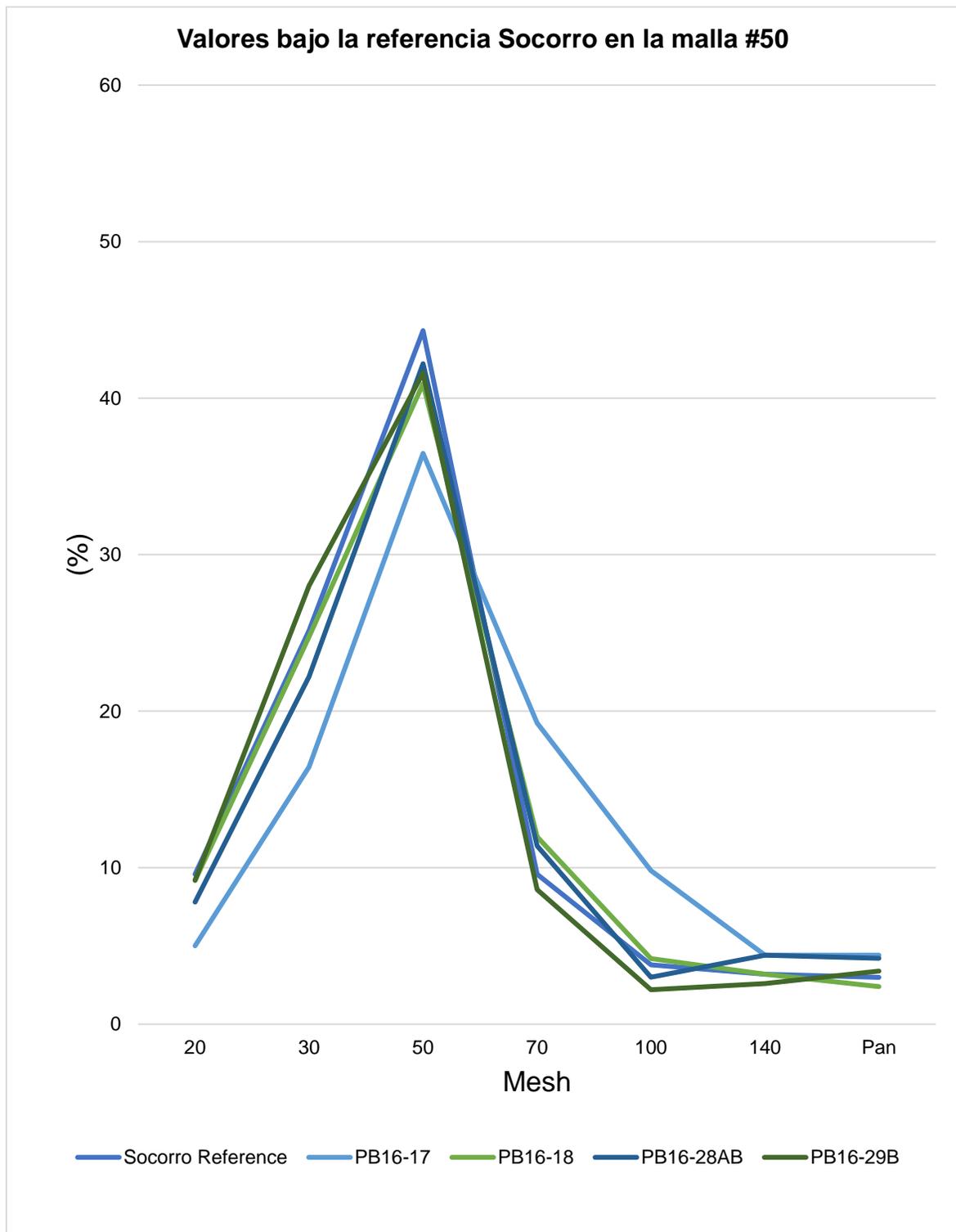


Figura 46. Comparación de los valores de expansión de la perlita Babidanchi que se encuentran con menor porcentaje de retenidos que la referencia de la mina Socorro en la malla 50 (297  $\mu\text{m}$ ).

## APLICACIONES

Con la distribución de la granulometría obtenida en el proceso de expansión, podemos crear un gráfico (*Figura 47*) de barras que indica los porcentajes de la granulometría en el material, según las granulometrías necesarias para las distintas aplicaciones de las partículas de perlita expandida.

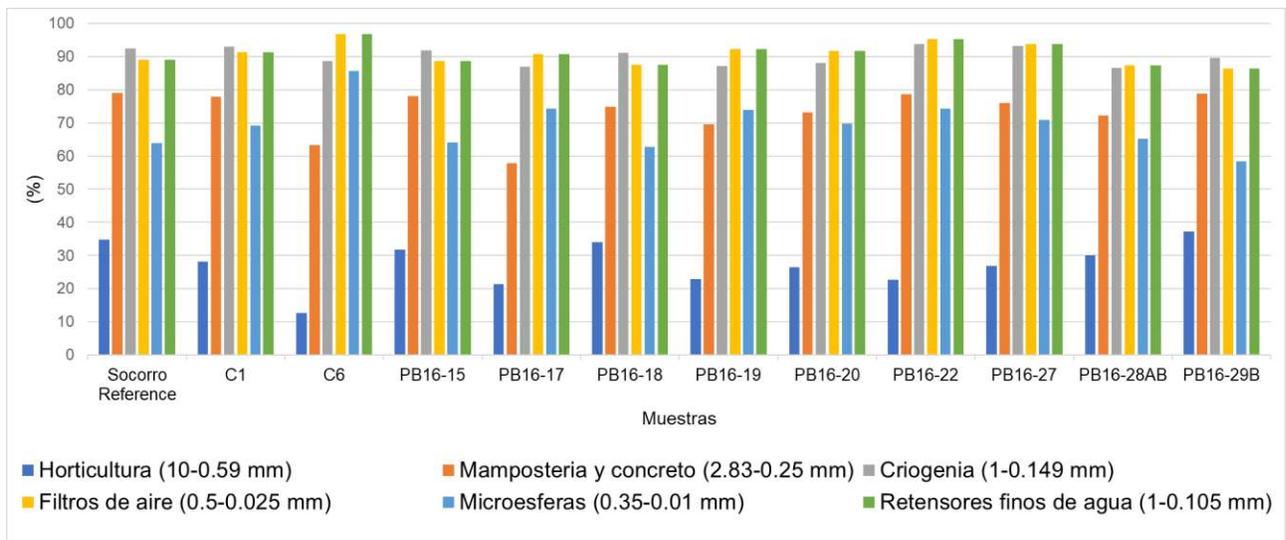


Figura 47. Proporción utilizable por aplicaciones.

En lo general, se aprecia similitud con los probables usos de la perlita Babidanchi con los de la referencia de la mina Socorro. Se aprecia que el uso de menor porcentaje es en el ramo de la horticultura, con porcentajes menores al 40%, en el ramo de mampostería y concreto se observan proporciones aproximadamente entre el 60 y 80%, porcentajes similares presenta el ramo de microesferas con aproximadamente 60 y 85%. Los usos de mayor proporción en este análisis son; criogenia, filtros de aire y retenedores finos de agua, estos se encuentran con porcentajes alrededor del 90% de las partículas de perlita expandida. Los usos según el tamaño de la partícula se tomaron de una tabla de aplicaciones del Instituto de la Perlita (*Perlite Institute, 2016*).

## DENSIDAD EXPANDIDA Y PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN

En *figura 48A* se observa una tendencia a menores densidades expandidas en valores de menor porcentaje de pérdidas por ignición (LOI), o para el caso de este trabajo, los valores de densidad menores producto de la aplicación de calor, los resultados a densidades expandidas menores se dieron con valores de pérdidas por calcinación ligeramente mayores al 4%. En la figura se observan 4 grupos de muestras, 3 de ellos se encuentran por debajo de la *línea de tendencia de pérdidas por ignición y densidad expandida*, y uno por encima de ella. El grupo de perlitas representadas por puntos rojos (PB16-18, 28AB, 29AB) presentan densidades expandidas menores, este grupo tiene valores que difieren por centésimos superiores al 4.3% y densidades que varían en decimales alrededor de 21.5 kg/m<sup>3</sup>. Hay que mencionar que la muestra PB16-18 está a 1.5 kilómetros de las muestras PB16-28 y 29. El grupo de muestras representadas en color azul (PB16-15, 19, 20 y 27) tiene valores de pérdidas por calcinación con valores entre 5 y 6% con densidades entre 25 y 30 kg/m<sup>3</sup>. La muestra en amarillo (PB16-27) es la brecha perlítica, tiene valores de densidad expandida de 29 kg/m<sup>3</sup>, valores similares a las del grupo azul, pero con valores de pérdidas por calcinación ligeramente mayores al 7%. El grupo en morado (PB16-C1, 22, C6) se encuentra por encima de la línea de tendencia, este grupo cuenta con las densidades mayores (desde 32 a 45 kg/m<sup>3</sup>) y pérdidas por ignición muy variables (de 3.9 a 7.2%). Con esta tendencia se sugiere una relación entre las pérdidas por calcinación con una densidad expandida y que en el supuesto de expandir muestras por debajo de las pérdidas por calcinación mínimas deberá generarse una tendencia parabólica con un sentido positivo en el eje de las ordenadas. En este caso podemos observar una tendencia lineal, ya que con nuestros datos solamente representamos muestras que están por encima de la cantidad optima de pérdidas por calcinación, se infiere que, en el supuesto de expandir perlita con una hidratación secundaria pobre, que tenga valores bajos de pérdidas por calcinación, llegará el momento que la muestra no logre un cambio de densidad considerable. La evolución de la densidad en el proceso de expansión (*Figura 48B*), se puede comprender como el descenso que sufre la densidad según el contenido de agua (H<sub>2</sub>O) de la muestra cuando se aplica calor. Este cambio en la densidad se puede representar con una parábola con apertura positiva en el eje de las ordenadas. De la *Tabla*

1 se puede observar que la mayoría de las muestras corresponden a perlitas frescas, a un par de fibrosas, a las obsidianas y a la muestra brechoide. Hay que mencionar que las muestras de matriz fibrosa parecen ser más quebradizas que las de matriz fresca.

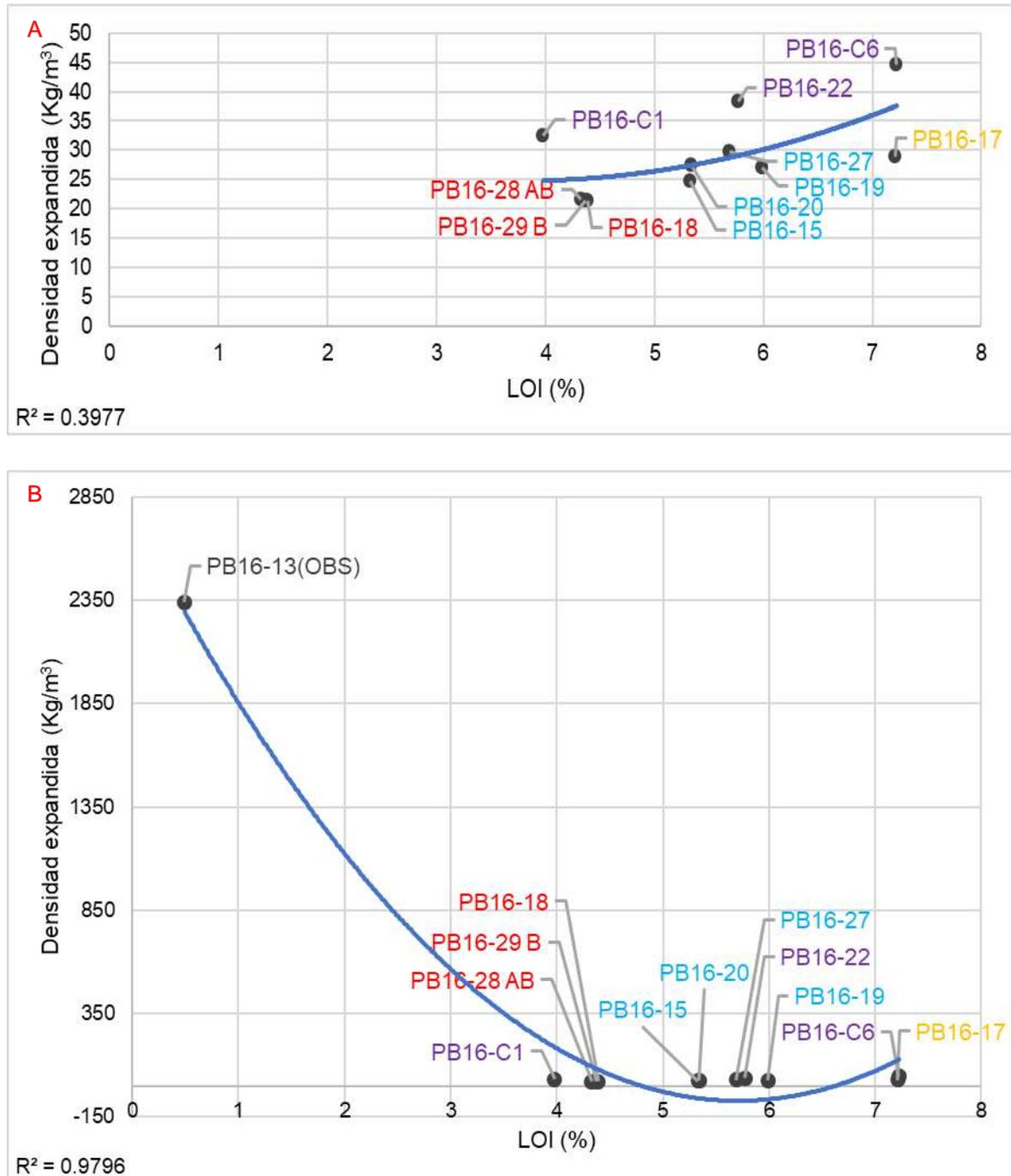


Figura 48. (A y B) Relación de la densidad expandida contra pérdidas por calcinación.

## **RENDIMIENTO AL HORNO**

En la *figura 49A y 49B* se observa una tendencia que representa la efectividad del rendimiento al horno y la densidad expandida. Para el caso de la *figura 49A* se observa en la tendencia que a mayor rendimiento del horno obtenemos densidades de expansión menores, pero al sobrepasar valores al 90% de rendimiento al horno obtenemos densidades expandidas más elevadas. El grupo de muestras en color rojo se encuentra alineado horizontalmente ya que presentan índices de expansión muy similares, dos de estas muestras se encuentran en valores cercanos al 90% en rendimiento al horno y espacialmente están a casi 1.5 kilómetros de distancia entre sí, la muestra restante tiene valores cercanos al 88% de rendimiento al horno. El grupo de perlitas representadas en color azul y en amarillo (brecha perlítica) se organiza horizontalmente entre valores de densidad expandida que van de los 25 a 30 kg/m<sup>3</sup> y rendimientos al horno desde 86.4 a 90.5%. En la parte superior de la tendencia se observa el grupo de muestras con los valores más altos en densidad expandida, están representadas en color morado y organizadas horizontalmente con rendimientos que varían de 84.58 a 93.32%. La perlita expandida logra generalmente su expansión óptima en rendimientos superiores al 90% (*Barker et al, 1987*). De la relación densidad expandida contra rendimiento al horno se ilustra (*Figura 49B*) el descenso de la densidad conforme aumenta el rendimiento al horno. Por la falta de consistencia en el orden de la densidad expandida con respecto al rendimiento al horno para este estudio, se infiere que a diferentes cantidades de agua en la muestra se obtendrán distintas densidades según el rendimiento del horno. Además, en la *figura 49B* podemos observar un coeficiente de correlación de Pearson con valor de 1, lo que indica que tenemos muy buen ajuste a la curva de tendencia.

Los valores de rendimiento del horno han sido proporcionados por el proveedor en unidades porcentuales, pero este se calcula dividiendo la temperatura a la que la perlita expandió entre la temperatura máxima del horno, esto multiplicado por cien. Los datos utilizados para la generación de los diagramas de análisis de datos del proceso de expansión se encuentran en las *tablas 4 y 5* del apartado anexos.

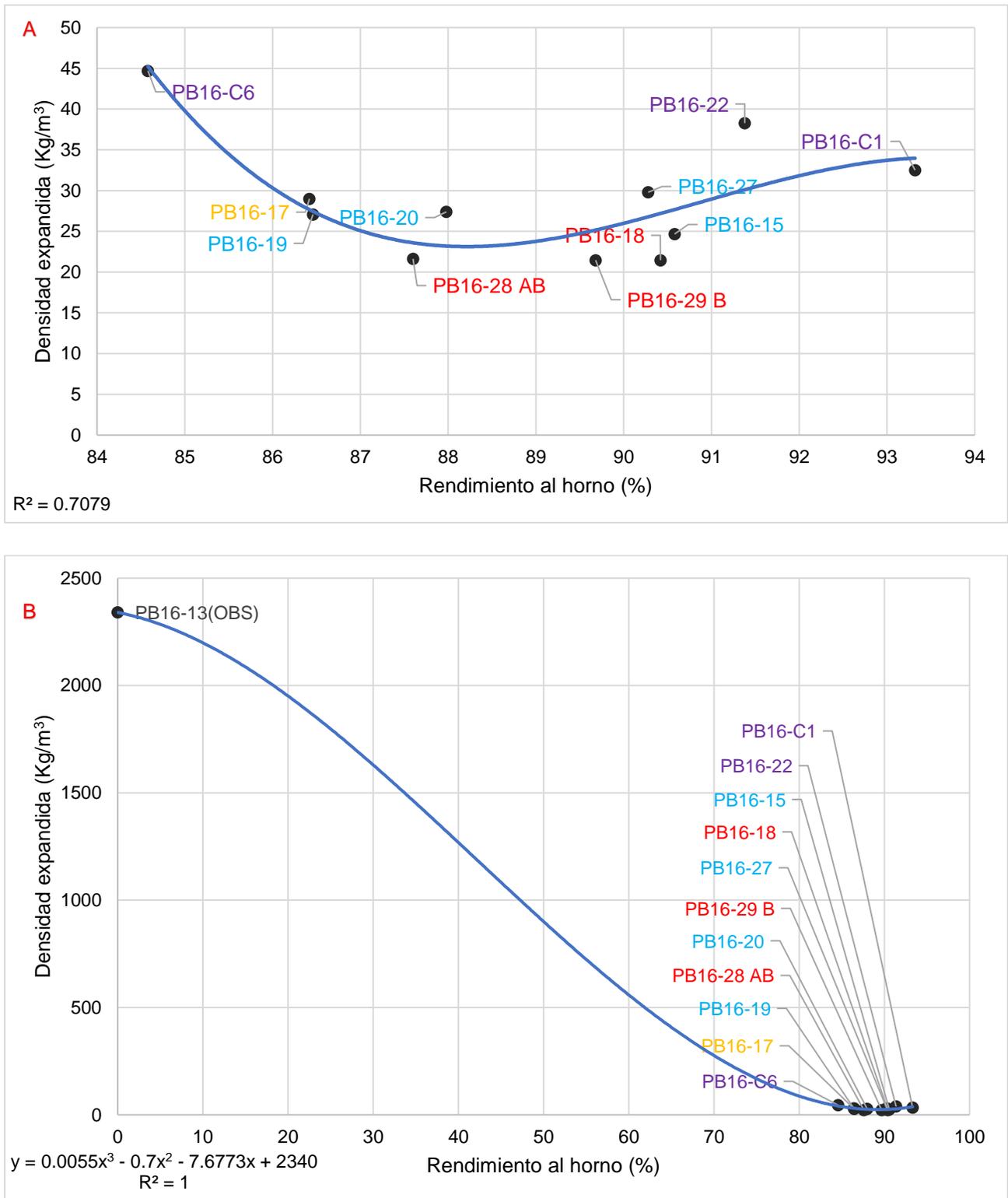
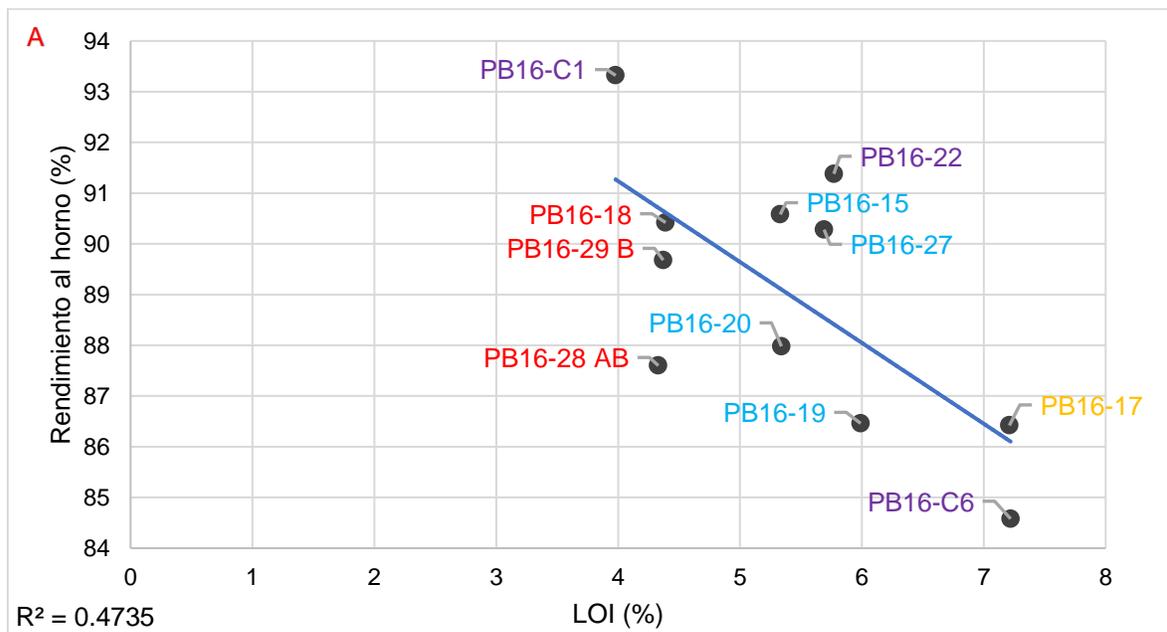


Figura 49. A y B Relación del rendimiento al horno contra densidad expandida.

## RELACIÓN RENDIMIENTO AL HORNO Y PÉRDIDAS POR IGNICIÓN

La figura 50A es una relación del rendimiento del horno con las pérdidas por ignición, se observa una tendencia en la que las muestras con menores pérdidas por ignición presentaron mayor rendimiento al horno. Se observa al grupo de muestras representadas en rojo agrupadas horizontalmente por debajo de la tendencia en rendimientos al horno cercanos a 88 y 90%. El grupo de muestras representadas en azul se encuentran por debajo y arriba de la tendencia en un rango de rendimiento al horno de 86.4 a 90.5%. La muestra de la brecha perlítica representada en color amarillo (PB16-17) se encuentra por encima de la tendencia ya que cuenta con valor alto de pérdida por ignición, y se encuentra en valores cercanos al 86.4%. De las muestras de perlita representadas en color morado, dos se encuentran por encima de la tendencia y una sobre la tendencia, estas muestras tienen el rango más amplio de rendimiento al horno, va desde 84.6 a 93.3%. En la Figura 50B se observa una tendencia que obedece a una ecuación parabólica con apertura negativa en el eje de las ordenadas, con un buen coeficiente de correlación. Este gráfico ilustra el comportamiento de las muestras según la cantidad de agua que contengan y como el rendimiento al horno disminuye al aumentar las perdidas por ignición.



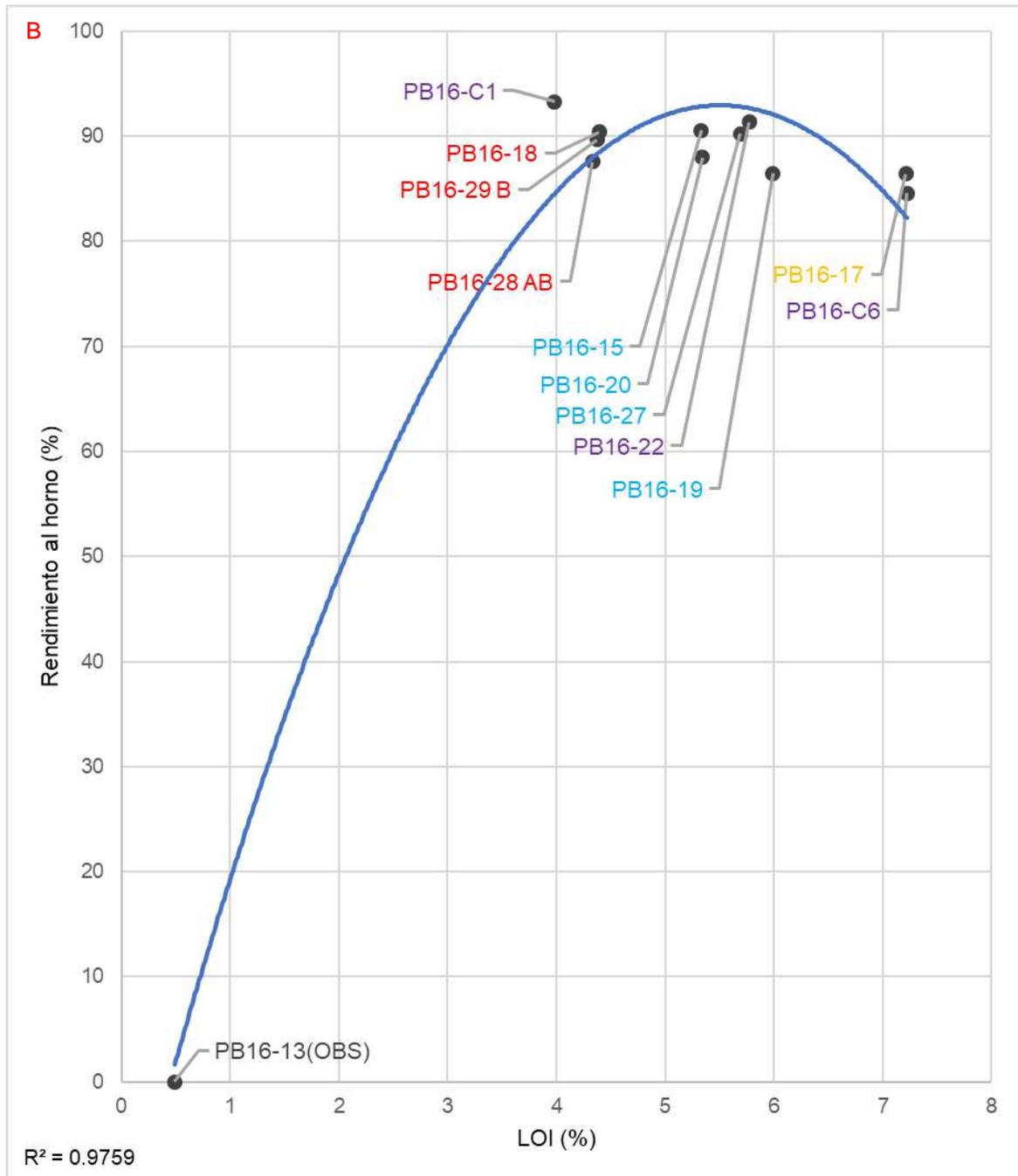


Figura 50. A y B Relación del rendimiento al horno contra pérdidas por calcinación.

## INTERDEPENDENCIA DE VARIABLES

La *figura 51* ilustra el comportamiento de una parábola producto de una función paramétrica, que fue evaluada con funciones auxiliares dependientes de la variable LOI, y se acompaña con las muestras analizadas, donde se aprecia a las muestras de densidades mayores más alejadas de la parábola paramétrica, en cambio, las de densidades menores son cercanas al borde o al plano que representa esta parábola.

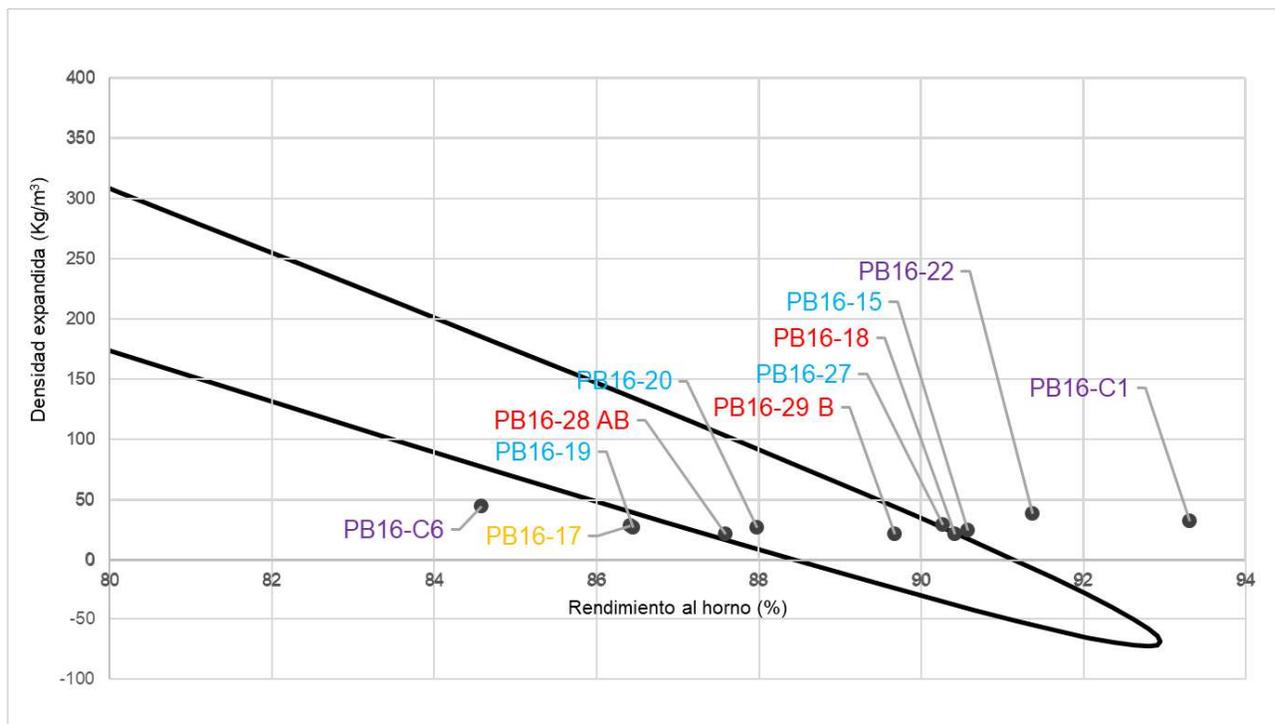


Figura 51. Paramétrica en función de LOI.

## ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Este índice representa la disminución de la densidad de la perlita cruda al pasar a ser perlita expandida, tiene un decremento muy significativo, considerando que el 100% es la densidad original de la roca, o sea, la de la perlita cruda. Para representar esta pérdida de densidad, se divide la densidad expandida entre la densidad de la perlita cruda:

$$\text{Índice de densidad expandida} = \frac{\text{Densidad final}}{\text{Densidad inicial}} * 100$$

Para este cálculo se tomó la densidad de la perlita cruda de una investigación de [Vidal-Solano y colaboradores](#) en el 2014, que incluye datos del área de estudio de la presente investigación. A continuación, se presentan el índice menor y mayor obtenidos:

Muestra	índice de densidad expandida (%)
PB16-C1	1.4325
PB16-C6	1.9688
PB16-15	1.0867
PB16-17	1.2772
PB16-18	0.9456
PB16-19	1.1926
PB16-20	1.2067
PB16-22	1.6865
PB16-27	1.3125
PB16-28 AB	0.9526
PB16-29 B	0.9456
PB16-13(OBS)	100 (No fue expandida)

Tabla 2. Índice de expansión.

Hay que acentuar que dos muestras obtuvieron el índice de expansión menor con el mismo contenido de agua, a pesar de encontrarse a 1.5 kilómetros de distancia entre sí.

## CÁLCULOS IDEALES MEDIANTE FUNCIONES INTERDEPENDIENTES

Teniendo en cuenta que fijando una de las distintas variables interdependientes de una muestra, podemos estimar el proceso de expansión mediante los siguientes cálculos, considerando que es un análisis estadístico basado en tendencias en el proceso de expansión. Este proceso se realizó en un horno sin precalentamiento y para granulometrías menores a la malla #50 (297  $\mu\text{m}$ ) y retenidos en la #100 (149  $\mu\text{m}$ ).

Al conocer una cantidad de LOI (%), supongamos 6% para este ejemplo, podemos utilizar las siguientes funciones; donde *DE* (Figura 52) es la densidad expandida y *RH* (Figura 53) el rendimiento al horno:

$$DE = 472.76LOI^{-1.666}$$

$$DE = 472.76(6\%)^{-1.666} = 24 \text{ kg/m}^3$$

$$RH = -19.56\ln(DE) + 154.04$$

$$RH = -19.56\ln(24 \text{ kg/m}^3) + 154.04 = 91.87\%$$

Lo que significa que con una muestra de perlita con 6% de LOI podríamos obtener una densidad expandida de 24kg/m<sup>3</sup>, en un caso ideal con un horno estable a 91.87%.

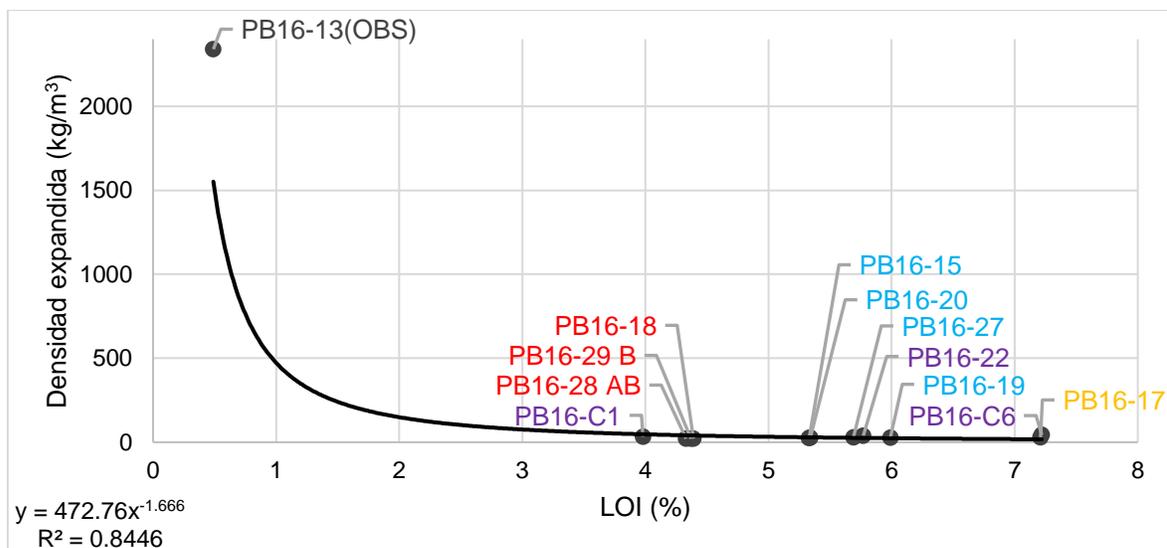


Figura 52. Tendencia potencial en función de LOI (%) y la densidad (kg/m<sup>3</sup>).

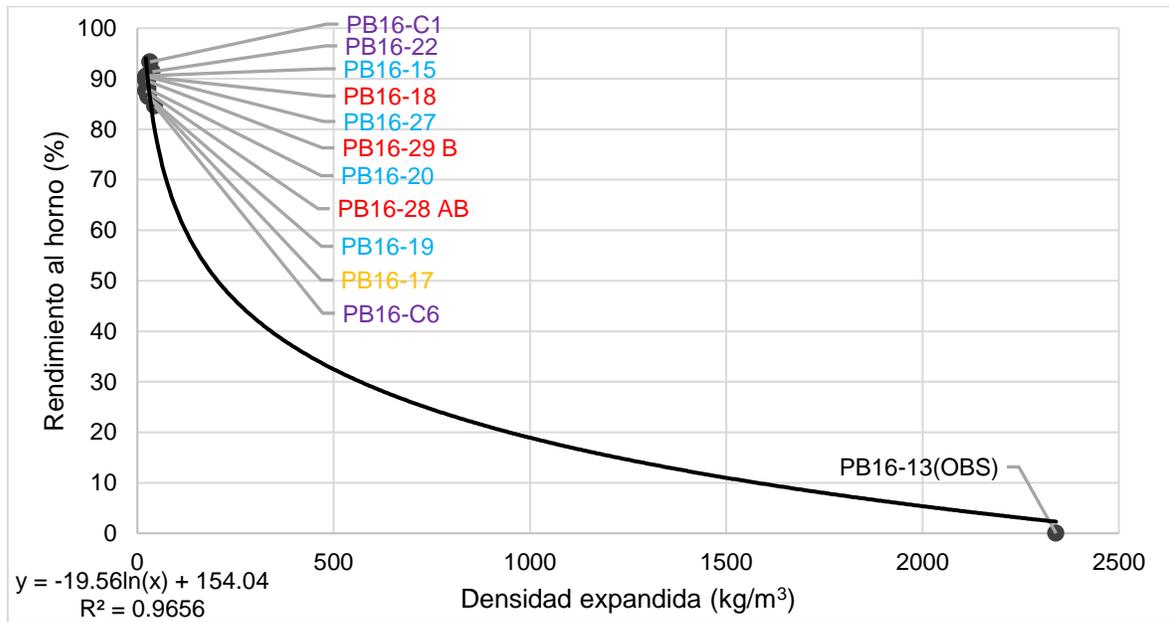


Figura 53. Tendencia logarítmica en función de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y el rendimiento del horno (%).

Suponiendo que se mantiene estable un horno con un rendimiento de 89%, podemos estimar *LOI* (Figura 54) y *DE* (Figura 52);

$$LOI = 0.5199e^{0.0261RH}$$

$$LOI = 0.5199e^{0.0261(89\%)} = 5.305\%$$

$$DE = 472.76LOI^{-1.666}$$

$$DE = 472.76(5.305\%)^{-1.666} = 29.33\text{kg/m}^3$$

Esto infiere que podemos obtener una densidad expandida de  $29.33 \text{ kg/m}^3$ , en una situación ideal con un horno estable a 89% y una muestra de perlita con 5.305% de *LOI*.

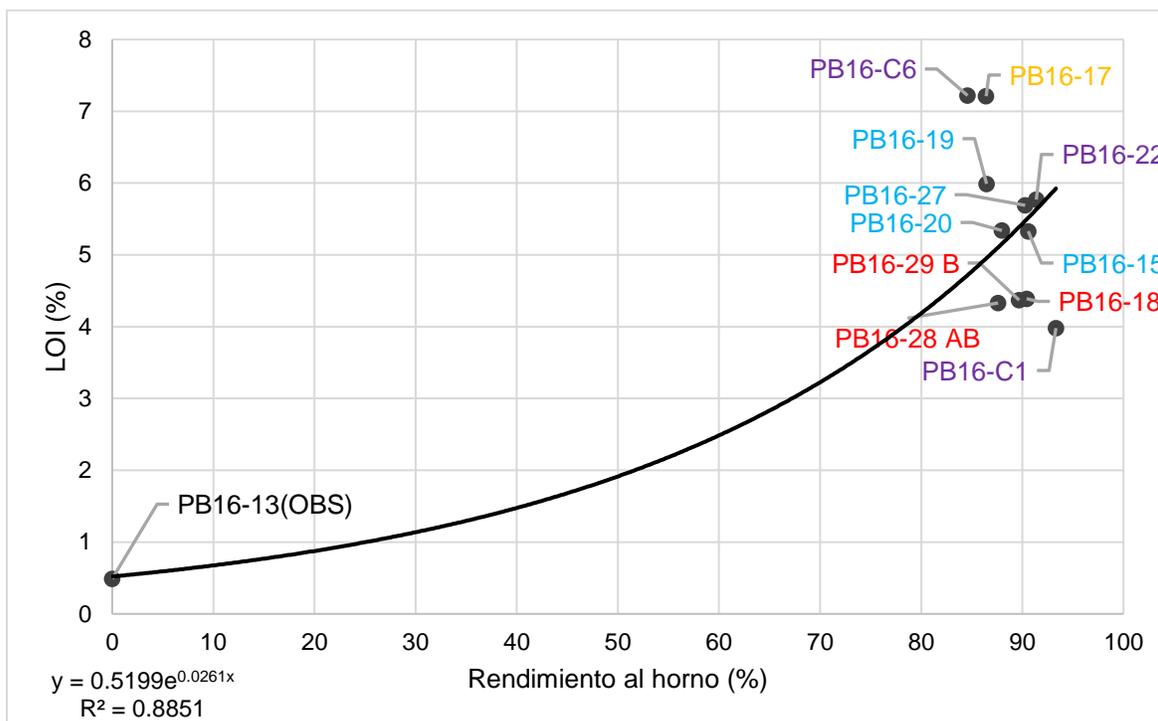


Figura 54. Tendencia exponencial en función del rendimiento al horno (%) y el LOI (%).

En el caso de querer una densidad expandida específica, por ejemplo  $25 \text{ kg/m}^3$ , se puede plantear el uso de las funciones *LOI* (Figura 55) y *RH* (Figura 56);

$$LOI = 28.538DE^{-0.507}$$

$$LOI = 28.538(25 \text{ kg/m}^3)^{-0.507} = 5.58 \%$$

$$RH = 33.945\ln(LOI) + 31.575$$

$$RH = 33.945\ln(5.58\%) + 31.575 = 89.90\%$$

Lo anterior plantea que en la búsqueda de una densidad expandida de  $25 \text{ kg/m}^3$ , la situación ideal del proceso de expansión sería con un horno estable a 89.90% y perlita con 5.34% de LOI.

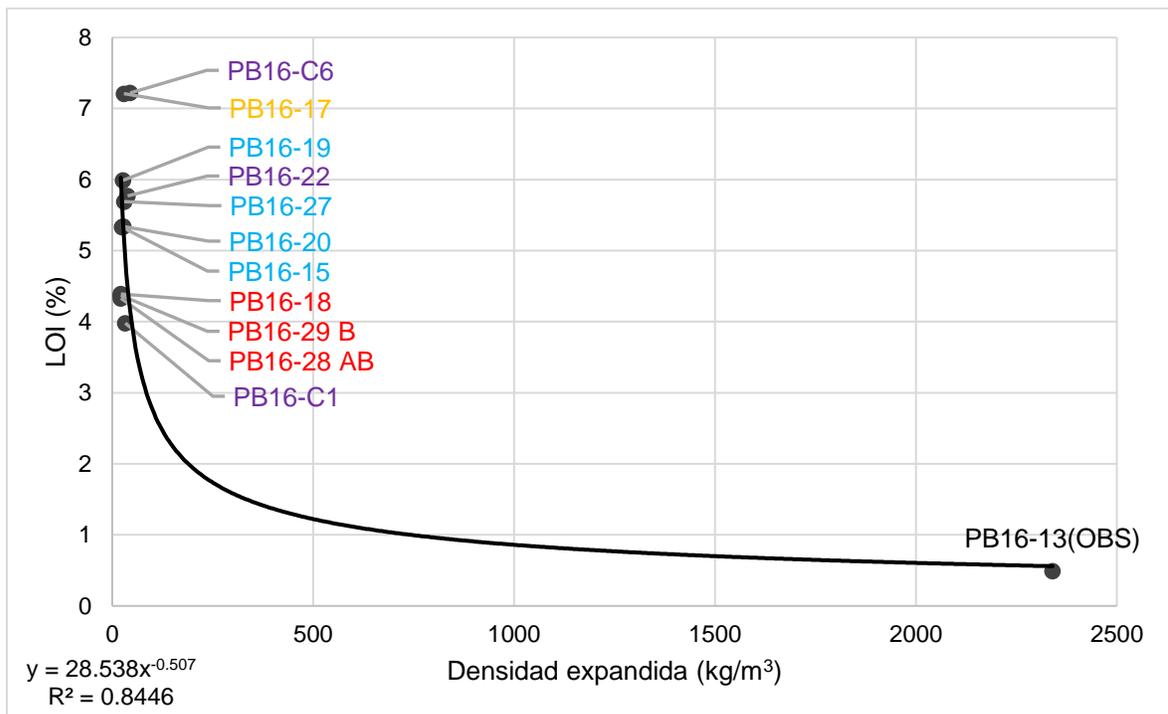


Figura 55. Tendencia exponencial en función de la densidad expandida (kg/m³) y el LOI (%).

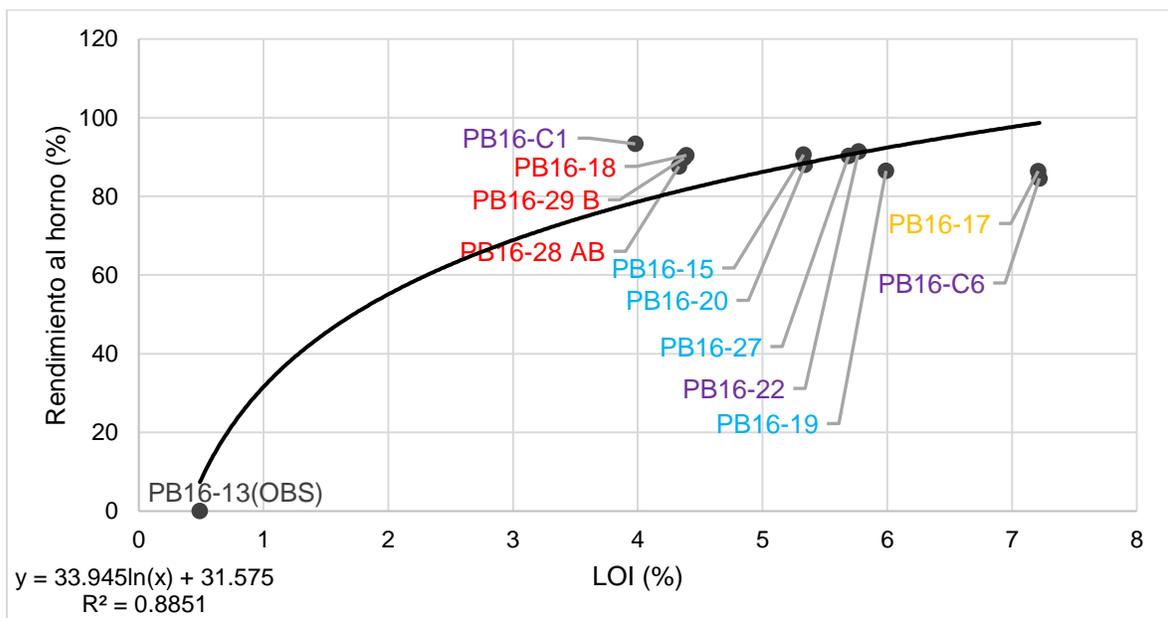


Figura 56. Tendencia logarítmica en función de LOI (%) y el rendimiento al horno (%).

En el caso de contar con dos variables fijas, como por ejemplo la densidad expandida deseada (*DE*) y el agua en las perlitas (*LOI*), teniendo como fin conocer el rendimiento del horno (%) recomendable, utilizamos funciones de las tendencias formadas, tomando como variable dependiente *RH* (Figura 57 y 53).  $DE=30 \text{ kg/m}^3$ ,  $LOI=5\%$ :

$$RH = 0.6672LOI^3 - 11.8LOI^2 + 66.397LOI - 29.722$$

$$RH = -19.56\ln(DE) + 154.04$$

$$RH + RH = 0.6672LOI^3 - 11.8LOI^2 + 66.397LOI - 29.722 - 19.56\ln(DE) + 154.04$$

$$RH = 0.3336LOI^3 - 5.9LOI^2 + 33.1985LOI - 14.861 - 9.78\ln(DE) + 77.02$$

$$RH = 89.08 \%$$

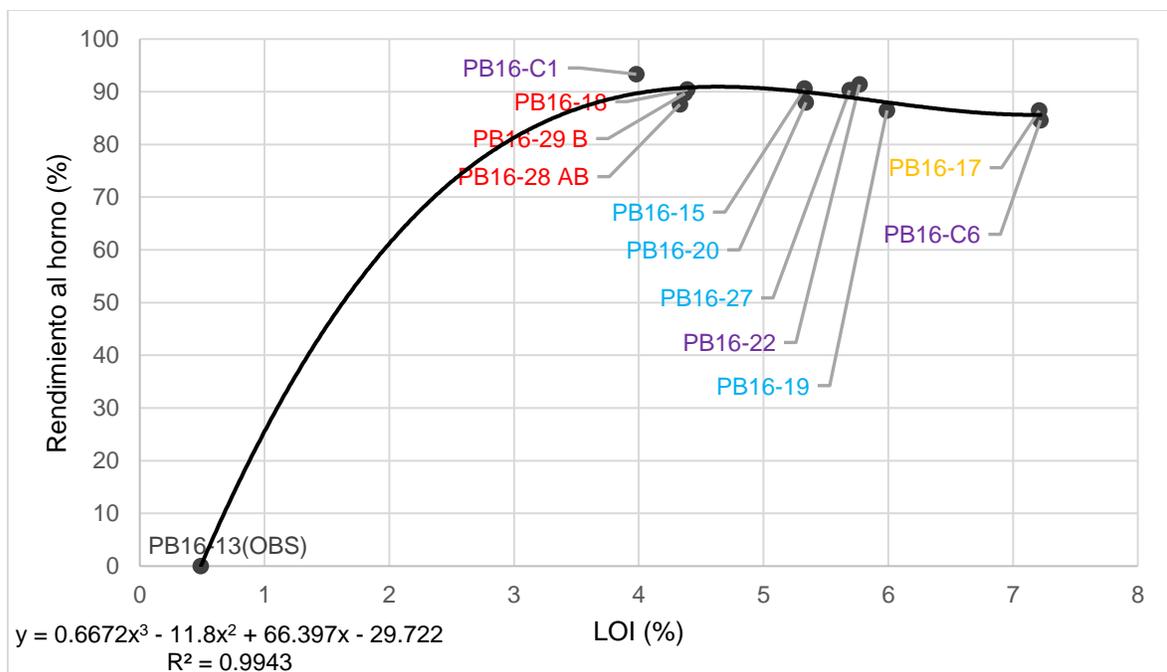


Figura 57. Tendencia de polinomio de tercer grado del rendimiento al horno en función de LOI.

## **DISCUSIÓN**

En zonas donde el proceso de perlitización no se logró al 100% se formaron nódulos de obsidiana o marekanitas, a estos nódulos anhidros, así como a los cristales que contengan las perlitas, se les verá relegados en el proceso de expansión como residuos, porque no son expandibles, por lo que no son de interés para su explotación. Estas áreas están bien localizadas en superficie, y se estima tienen pocos metros de espesor en los cuerpos dómicos. Para el análisis de expansión estos nódulos representan una muestra seca, a diferencia de las perlitas

La unidad litológica de mayor superficie en los domos es la brecha envolvente, aunque se estima tiene un espesor de pocos metros, se recomienda realizar estudios de barrenación con broca de diamante, para conocer los espesores reales de las distintas unidades perlíticas y poder hacer un cálculo volumétrico de las reservas. Se deduce que la litología de mayor volumen es la perlita, que es cubierta por la brecha envolvente.

Hay que mencionar que petrográficamente los cristales automorfos, gérmenes y microlitos, así como sus texturas y morfología, le otorgan una identidad a la roca dejándole una huella dactilar para identificar su procedencia en el depósito.

Las muestras analizadas en esta investigación fueron expandidas con un horno de laboratorio y comparadas con la referencia de la mina Socorro, por lo que se deduce que al ser expandidas con hornos especializados las tendencias de las relaciones físicas y químicas pueden ser manipuladas. Las muestras perlíticas del rancho Babidanchi son concordantes con la referencia Socorro, y tienen en muchos casos valores ligeramente mayores en los retenidos de la malla #50 (297  $\mu\text{m}$ ).

Los datos utilizados para la relación pérdidas por ignición y densidad expandida representan en su mayoría valores de un lado del eje de simetría de una parábola que tiene en su vértice la densidad menor de expansión, este eje corresponde al que se puede trazar con los valores más positivos (elevados) de pérdidas por ignición.

En los diagramas utilizados los valores de densidad menores son resultado de expansiones mayores, por el contrario, cuando hablamos de valores de densidad altos se

refiere a menor volumen de expansión. Los comparativos de datos geoquímicos, como pérdidas por calcinación, contra datos de expansión sirven para establecer una base representativa del comportamiento de la perlita en el horno. Hay que tener en cuenta que el expandir perlita en hornos especializados, se reflejará en la certidumbre de los diagramas.

En los elementos químicos mayores comparados contra las pérdidas por ignición, al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub>O, el Hierro se mantiene constante y el Magnesio aumenta, en cambio en la relación entre el Hierro/Magnesio contra la cantidad de pérdidas por ignición, se observa una tendencia a disminuir de la relación Hierro/Magnesio cuando las pérdidas por ignición aumentan. En las relaciones de los elementos químicos menores contra la cantidad de pérdidas por ignición, encontramos que cuando aumenta la cantidad de pérdidas por calcinación (H<sub>2</sub>O) se incrementan los valores de Mg#, también los valores de la relación de alcalinidad (A/CNK) aumentan, además de la relación Potasio/Sodio (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O). Esto también es observable en el diagrama discriminador de la serie toleítica o calci-alcalina, solo que se comportan de forma vertical, en donde la de menor contenido de Hierro/Magnesio es la brecha perlítica, la muestra con más alto contenido de pérdidas por ignición. La muestra con mayor contenido de Hierro y Magnesio es la perlita con menor proporción de pérdidas por ignición.

Existe una diferenciación producto de la hidratación secundaria, ésta afecta de manera distinta a los elementos, algunos tienen incrementos proporcionales relacionados al aumento del H<sub>2</sub>O, aunque otros tienen decrementos en sus valores porcentuales.

La adición de agua secundaria en el proceso de emplazamiento del magma formador de las rocas riolíticas con fractura perlítica, alteran la proporción geoquímica de los elementos químicos que las componen.

El análisis de las muestras perlíticas mediante diagramas multi-elementos normalizados a los valores de la obsidiana, permite comparar los elementos de la roca inicial con los valores de los elementos de la roca producto del proceso secundario de hidratación.

## **CONCLUSION**

Para el estudio de la perlita hay que tener en cuenta que la densidad expandida, pérdidas por ignición y el rendimiento al horno, son variables interdependientes, por lo que, al realizar un análisis de dos de estas tres variables, la excluida está implícita en el cálculo.

En el proceso de expansión, la densidad expandida y el rendimiento al horno son interdependientes de la cantidad de agua que contengan las perlitas, esto depende de la granulometría de las partículas que se introduzcan al horno. Esto debe ser analizado teniendo una referencia en seco, o sea sin agua, por lo que se eligió la obsidiana para representarla.

Los cálculos presentados a partir de funciones formadas por líneas de tendencias potenciales, logarítmicas y exponenciales suponen una situación ideal en el proceso de expansión para una granulometría conocida. Estos cálculos pueden ayudar a predecir y organizar zonas de explotación.

Las muestras fuera del plano paramétrico (Figura 51) que están por la parte más elevada del rendimiento al horno han sido calcinadas o han pasado el punto de fusión, por lo que obtuvieron densidades mayores, en cambio, las que están por debajo de la paramétrica, en los valores menores de rendimiento al horno, no llegaron a la densidad más baja que pueden expandir, y las muestras que se posicionan en el borde o en plano paramétrico corresponden a las que presentaron densidades menores, debido a que el rendimiento al horno fue considerablemente óptimo según la cantidad de agua en la muestra.

La regresión generada en la curva paramétrica evaluada explica como al expandir las muestras y pasar el punto de fusión regresan a densidades mayores, o al no llegar a rendimientos óptimos del horno no se logran las densidades menores que se pudieran obtener. Esta interpretación ayuda a modelar un comportamiento, que tiene como fin predecir densidades expandidas resultantes según el rendimiento al horno, teniendo conocimiento de la cantidad de agua de las perlitas y su granulometría.

El enriquecimiento de datos en los diagramas comparativos de densidad expandida, en relación con las pérdidas por ignición y rendimiento al horno, y de la relación pérdidas por ignición con el rendimiento al horno, así como las interdependencias de LOI, obtenemos ilustraciones representativas del comportamiento, que nos pueden ayudar a evaluar y pronosticar el proceso de expansión con mayor detalle.

La clasificación petrográfica permitió diferenciar la perlita de la roca original por medio de la caracterización de marekanitas, mostró los rasgos mineralógicos que ambas comparten, y su diferencia textural. La caracterización petrográfica de las distintas perlitas mostró una consistencia en cuanto al contenido mineral, exhibió que algunas diferencias obvias en muestra de mano no son discriminatorias para una selección de muestras para expansión y geoquímica, aunque es de gran utilidad observar el desarrollo de la textura perlítica y el lustre vítreo de la roca.

La identificación de cristobalita por medio de difracción de rayos X permite conocer de la temperatura del magma durante su cristalización, además de corroborar la mineralogía, ya que las secciones delgadas contenían en su mayoría criptocristales de óxidos de Fe-Ti y pocos microfenocrstales identificables de fayalita.

Según la observación en sección delgada de las muestras de los depósitos Selene y La Bendición, y por medio de las relaciones de las propiedades físicas tomadas en el proceso de expansión, y sus concordancias con datos geoquímicos, permiten inferir que se trata de un solo depósito perlítico que es cubierto por las litologías sobreyacentes en su parte central.

La concordancia entre las muestras representadas en los diagramas multi-elementos demuestran que las perlitas de los dos depósitos y la obsidiana corresponden a rocas provenientes del mismo magma.

La relación de pérdidas por ignición y densidad expandida permite generar una tendencia de la densidad expandida de la perlita según su porcentaje de H<sub>2</sub>O. Esta tendencia indica que las perlitas tienen un índice máximo de expansión, que puede encontrarse al analizar valores cercanos al 4.3% de pérdidas por ignición para este yacimiento, lo que

debiera resultar en una tendencia parabólica con una ecuación de polinomio de segundo grado, donde la máxima de expansión estaría en el vértice de una parábola de sentido positivo en el eje de las ordenadas. Con los datos utilizados en la investigación, se concluye que la relación rendimiento al horno y pérdidas por ignición indica que un mayor rendimiento del horno se obtiene con bajos valores de pérdidas por ignición, y en la relación rendimiento al horno contra densidad expandida, se obtienen densidades menores de la perlita cuando hay mayor rendimiento al horno, y que estas relaciones pueden ser manipuladas con hornos y procedimientos que brinden *rendimientos óptimos según la necesidad del producto*.

Ya que la cantidad resultante de agua secundaria agregada a cada muestra es ligeramente distinta, provoca que se generen dispersiones y tendencias, que forman grupos y lineaciones que ilustran la afectación por el proceso geoquímico de hidratación. Además, la aplicación de funciones generadas a partir de estas tendencias puede ayudar a predecir el comportamiento de muestras que se colecten en el mismo yacimiento.

El aumento en los valores de la hidratación secundaria formadora de la perlita y los altos valores de Sílice, están ligados a un aumento de alcalinidad del yacimiento, mientras que la relación potasio/sodio aumenta a mayor cantidad de pérdidas por ignición, la Sílice disminuye.

La mineralogía presente en las muestras representa partículas no expandibles que, en caso de pasar a ser un residuo en el proceso de expansión, hay que considerar su remoción, en caso contrario formarían parte de la perlita expandida.

El incremento de Magnesio está relacionado al incremento de pérdidas por ignición, es decir a la hidratación secundaria del vidrio, esto puede deberse a que al ser un elemento muy común en la corteza y en la hidrosfera, debió ser añadido por las partículas de H<sub>2</sub>O al formar las perlitas. Los elementos traza, Cesio y Estroncio son elementos móviles que también parecen estar relacionados al H<sub>2</sub>O alojada en los vidrios perlíticos.

Para la selección de muestras en campo, se recomienda elegir muestras de perlita de apariencia fresca con lustre vítreo brillante, ya que en el caso de escoger las de color más claro y textura fibrosa pueden haber tenido una hidratación secundaria superior, esto ya que

las de lustre fresco y vítreo parecen expandir a densidades menores. La gravilla de perlita no debe considerarse necesariamente perlita alterada y/o desvitrificada, ya que su graduación se debe a que está en una zona de falla.

## **PROPUESTAS**

- I. Realizar un muestreo amplio para generar una base de datos que tenga mayor representatividad sobre el yacimiento (analizar muestras de perlita en los perímetros de los núcleos de obsidiana).
- II. Diseño de caminos, tajo, tepetateras, plantilla para voladuras en zona cubierta por basaltos, así como los elementos mineros necesarios. Esto con fines de estimar costos de diseño, preparación y extracción, además de generar una logística.
- III. Hacer un análisis de beneficios según las distintas aplicaciones.
- IV. Realizar análisis químicos en la perlita expandida, teniendo como fin diferenciar los elementos que quedan retenidos en la perlita expandida, y las que pierde en el proceso de expansión, esto puede ayudar a predecir las cantidades de material residuo del proceso de expansión.
- V. Realizar un estudio de impacto ambiental, y un análisis geotécnico para obtener las propiedades físicas que serán de ayuda en la explotación y transporte.
- VI. Prospección geofísica por método gravimétrico.
  - Modelamiento 3D de los datos.
    - Interpretación.
- VII. Realizar una cuantificación de reservas probables, y un análisis de costos para barrenación y extracción.
- VIII. Plantilla de barrenación con broca de diamante, teniendo como finalidad obtener muestras para realizar los análisis presentados en esta investigación en distintos niveles de profundidad, además para corroboración de la parte central del yacimiento.
  - Modelamiento 3D con datos geoquímicos, expansión y rendimiento al horno.
    - Localizar zonas con los distintos índices de expansión.

- IX. Rectificar con los métodos de exploración mencionados que se trata de un solo domo perlítico.
- X. \*Negociación del área fuera del predio\*.
- XI. Hacer diseños de expansión, considerando las variaciones de LOI y variando los tamaños de partícula retenidos en las distintas mallas, teniendo en consideración acotar a detalle.

## **BIBLIOGRAFÍA**

*Allen, 1988. False Pyroclastic Textures in Altered Silicic Lavas, with Implications for Volcanic-Associated Mineralization. Department of Earth Sciences, Monash University, Clayton, Victoria 3168, Australia. Economic Geology Vol. 83, 1988, pp. 1424-1446*

*Alonso, 2018. Estudio experimental de la expansión de partículas de perlita. Tesis de maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Sonora.*

*Almazán Holguín y Trelles Monge, 1986. Geología de los depósitos de perlita del municipio de Huachinera, Sonora. Universidad de Sonora, Departamento de Geología. p. 29-45.*

*Barker J.M., Hingtgen J.S., y Bowie M.R., 1987. Perlite expansion and testing at the New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Socorro, NM. Technical Papers, MINING ENGINEERING, Vol. 39, No. 1. January 1987, pp. 33-36.*

*Boynton., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., Developments in Geochemistry, Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, 63-114.*

*Calmus Thierry, Vega-Granillo Ricardo, Lugo-Zazueta Raúl, 2011. Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico tardío y el Cenozoico. Panorama de la Geología de Sonora, México. Boletín 118. Cap. 7, p. 227-266. ISSN 0185-5530.*

*Cathryn Gifkins, 2005. Altered volcanic rocks, a guide to description and interpretation. University of Tasmania, Australia. Private Bag 79, Hobart, Tasmania, Australia 7001*

*Cochemé y Demant, 1991. Geology of the Yécora área, northern Sierra Madre Occidental, Mexico. Geological Society of America. Special Paper 254, p. 81-94.*

*Demant Alain, Cochemé Jean Jacques, Delpretti Pascale, Piguet Patrick, 1989. Geology and petrology of the Tertiary volcanics of the northwestern Sierra Madre Occidental, Mexico. Bull. Soc. géol. France, 1989, (8), t, V, n° 4, pp, 737-748.*

*Fang-Zhen Teng, 2017. Magnesium Isotope Geochemistry. Isotope Laboratory, Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA. P. 247*

*Ferrari Luca, Valencia-Moreno Martín, Bryan Scott, 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del centenario. Temas selectos de la geología mexicana. Tomo LVII, Núm. 3. 2005, p. 343-378.*

*Friedman y Smith. 1958. The deuterium content of water in some volcanic glasses. Geological Society of America Bulletin, v. 77. 323-328.*

*González-Sandoval, 1983. Estudio geológico-económico preliminar de rocas industriales y minerales no metálicos del estado de Sonora. Tesis de licenciatura en Geología. Universidad de Sonora.*

*H12-B86, 2003. Villa Hidalgo. Servicio Geológico Minero, Carta geológica 1:50,000.*

*H12-B86, 2005. Villa Hidalgo. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Carta topográfica 1:50,000.*

*Harker, 1909. The Natural History of Igneous Rocks. Fellow of St. John's College. Lecturer in petrology in the University of Cambridge.*

*Hinojosa-García, 2016. Determinación de propiedades físicas, químicas y térmicas de partículas de perlita del estado de Sonora. Tesis de maestría de Metalurgia Extractiva. Universidad de Sonora.*

*Hinojosa-Prieto Héctor Roberto, Vidal-Solano Jesús Roberto, Kibler Karl, Hinojosa-García Héctor Jesús, 2016. Geology of the Selene perlite deposit in the northern Sierra Madre*

*Occidental, northeastern Sonora, Mexico. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 68, Núm. 1, 2016, p. 129-163.*

*Irvine y Baragar, 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. Geological Survey of Canada, Ottawa, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences. Pp. 523-548.*

*Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., and Horiuchi, M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos: Mining Geology, v. 26, p. 105-17.*

*King, 1939. Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico. Geol. Soc. of Am. Bull. V. 50. Pp. 1685-1722.*

*Le Bas, Le Maitre, Streckeisen, Zanettin, 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal Petrology, 27, p. 745-750.*

*Marshall, 1961. Devitrification of natural glass. Geological of America Bulletin, v. 72, p. 1493-1520, Pasadena.*

*McPhie, Doyle, Allen, 1993. Volcanic textures, a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. National Library of Australia Cataloguing in Publication Entry. p. 25.*

*Miyashiro, 1974. Volcanic rock series in island arc and active continental margins. American Journal of Science, 274, p. 321-355.*

*Moore A.E., 1988. Olivine: a monitor of magma evolutionary paths in kimberlites and olivine melilitites. Department of Geochemistry, University of Cape Town, Private Bag, Rondebosch 7700, South Africa\* Contributions to Mineralogy and Petrology. 99:238-248.*

*Morán Zenteno, 1984. Geología de la república mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. p. 4 ISBN 968-881-060-6.*

*Panagiotis M Angelopoulos et al, 2016. Production of durable expanded perlite microspheres in a Vertical Electrical Furnace. School of Mining and Metallurgical Engineering, National*

*Technical University of Athens, Athens, Greece. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 123012061.p. 3."*

*Peccerillo y Taylor, 1976. Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic Rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contribution to Mineral Petrology., 58, p. 63-81.*

*Perlite Institute, 2009. Applications of perlite, the versatile mineral. Perlite Institute, Inc. <https://www.perlite.org/wp-content/uploads/2018/03/perlite-wheel.pdf>*

*Perlite Institute, 2016. Grades of Expanded Perlite & Perlite Particle Size. Perlite Institute, Inc. <https://www.perlite.org/wp-content/uploads/2018/03/perlite-grades-sizes-v3c.pdf>*

*Pettijohn, 1957. Sedimentary rocks, Second edition, Harper and Brothers, N. Y. pp. 55-75.*

*Roldan, 2011. Evolución del conocimiento de la geología de Sonora, México. Panorama de la Geología de Sonora, México. Boletín del Instituto de Geología No. 118. Cap. 1, p. 1-24. ISSN 0185-5530.*

*Ross y Smith, 1955. Water and other volatiles in volcanic glasses. U.S. Geological Survey, Washington 25, D.C. p. 1071-1087.*

*Ross, 1962. Microlites in glassy volcanic rocks. U. S. Geological Survey, Washington, D. C. The American Mineralogist, Vol. 47 May-June, 1962, p. 723, 739.*

*Sun y McDonough., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications 1989; v. 42; p. 313-345.*

*United States Environmental Protection Agency. Emission Factor Documentation for AP-42 Section 8.17: Perlite Processing.*

*Valencia-Moreno, 2007. Geological and metallogenetic characteristics of the porphyry copper deposits of México and their situation in the world context. Geological Society of America. Special Paper 422. p. 433-458. DOI:10.1130/2007\_2422(01).*

*Vidal-Solano J.R., Reyna M., Gastelum J., Hinojosa-García H., Perez-Tello M., Hinojosa-Prieto H., Escareño-Márquez P., 2014. Characterization petrographic, geochemical and*

*thermal gravimetric on some perlite Oligocene deposits in the State of Sonora, Mexico: Contribution to the study of the metallurgical process of expansion. Advances in Minerals and Materials Engineering® (ISBN: 978-1-312-76432-3).*

## ANEXOS

<b>Muestra</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altitud</b>	<b>Unidad litológica</b>
PB16-01,02 y 03	684722.15	3336295.55	1283.00	Perlita
PB16-04	684495.14	3335893.04	1313.00	Anillo piroclástico
PB16-13	684782.26	3335873.14	1386.00	Perlita núcleos de obsidiana
PB16-05	685010.85	3335786.74	1368.00	Brecha perlítica superior
PB16-08	683773.62	3336418.42	1310.00	Ignimbrita superior
PB16-09	683375.00	3335869.00	1351.00	Brecha perlítica superior
PB16-10	683473.80	3335787.80	1382.00	Perlita fluidal
PB16-11	683439.48	3335728.50	1361.00	Riolita microcristalina
PB16-29	683454.03	3335673.11	1426.00	Gravilla de perlita
PB16-28	683452.53	3335674.98	1450.00	Gravilla de perlita
PB16-12	683409.12	3335554.62	1477.00	Perlita núcleos de obsidiana
PB16-C1	683127.00	3335593.00	1398.00	Perlita fluidal
PB16-C6	683429.00	3335229.00	1485.00	Perlita fluidal
PB16-14	684410.85	3336311.08	1276.00	Andesita inferior
PB16-15	684888.20	3336238.33	1275.00	Perlita fluidal
PB16-16	684831.09	3336327.85	1307.00	Anillo piroclástico
PB16-17	684834.63	3336320.50	1296.00	Brecha perlítica superior
PB16-18	684766.79	3336283.19	747.00	Perlita fluidal
PB16-19	684720.50	3336307.81	1310.00	Perlita fluidal
PB16-23	684698.00	3336220.00	1303.00	Ignimbrita superior
PB16-20	684705.15	3336234.54	1266.00	Perlita fluidal
PB16-22	684887.45	3336182.87	1251.00	Perlita fluidal
PB16-24	684758.24	3336156.76	1303.00	Riolita microcristalina
PB16-25	684764.23	3336107.79	1340.00	Perlita fluidal
PB16-26	684791.51	3336127.09	1282.00	Riolita microcristalina
PB16-27	684895.57	3335910.33	1340.00	Perlita fluidal
PB16-13	684909.53	3335854.31	1367.00	Perlita núcleos de obsidiana

*Tabla 3. Muestras de las litologías observadas en los márgenes del yacimiento perlítico del rancho Babidanchi.*



# UNIVERSIDAD DE SONORA

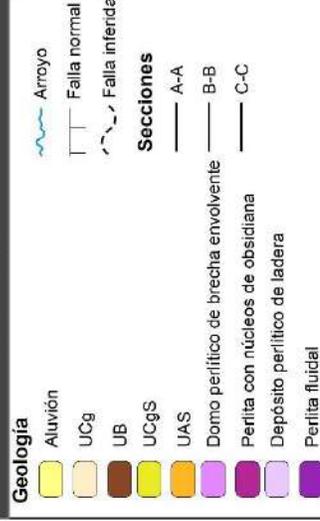
*División de Ciencias Exactas y Naturales*

**Departamento de Geología**

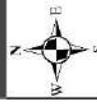
## LOCALIZACIÓN



## LEYENDA



## ESCALA



## PROYECCIÓN

Sistema de Coordenadas: Datum:

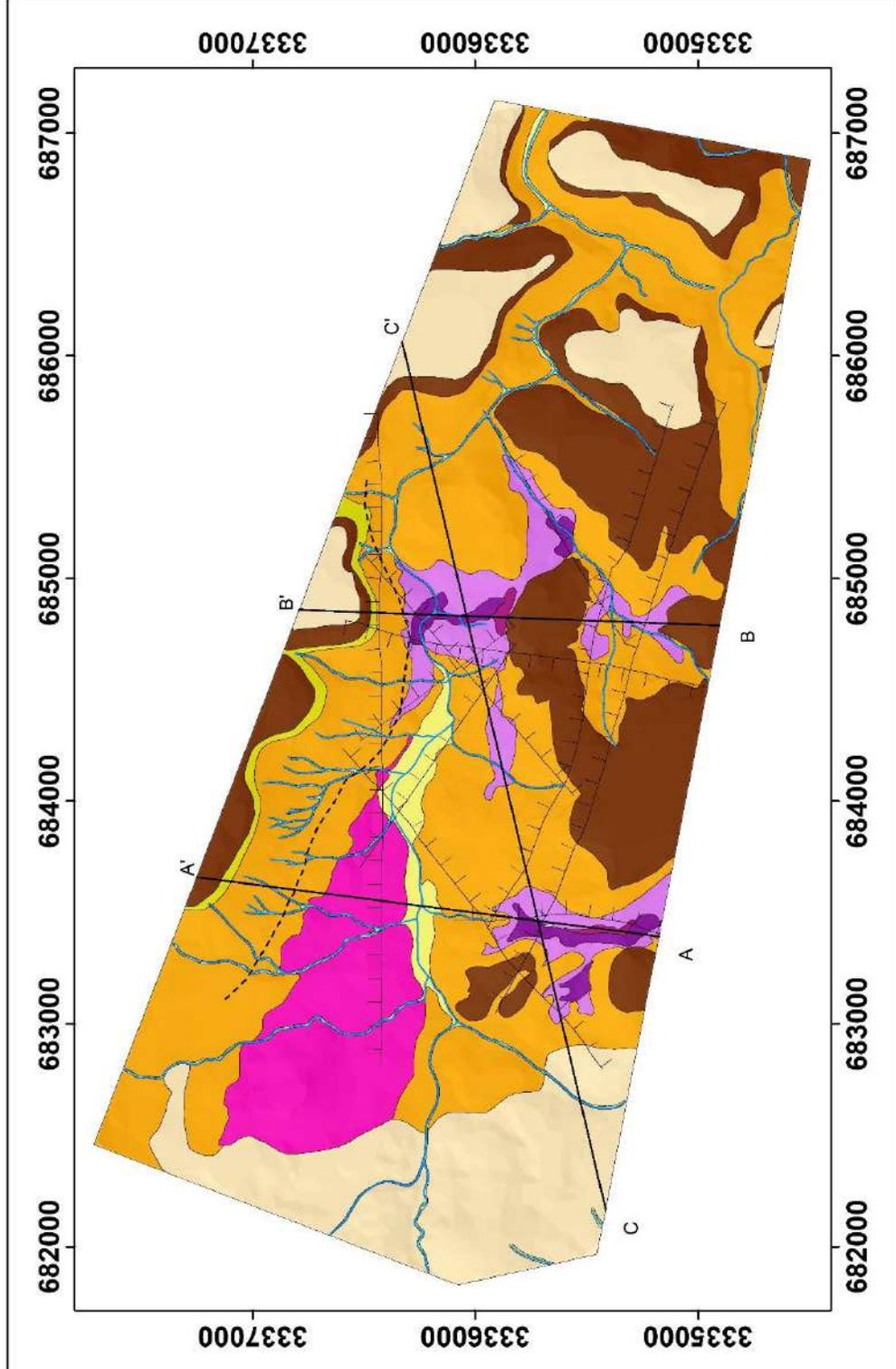
WGS 1984 UTM Zona 12N WGS 1984

Proyección:

Transverse Mercator

Unidades:

Metros



## SECCIONES

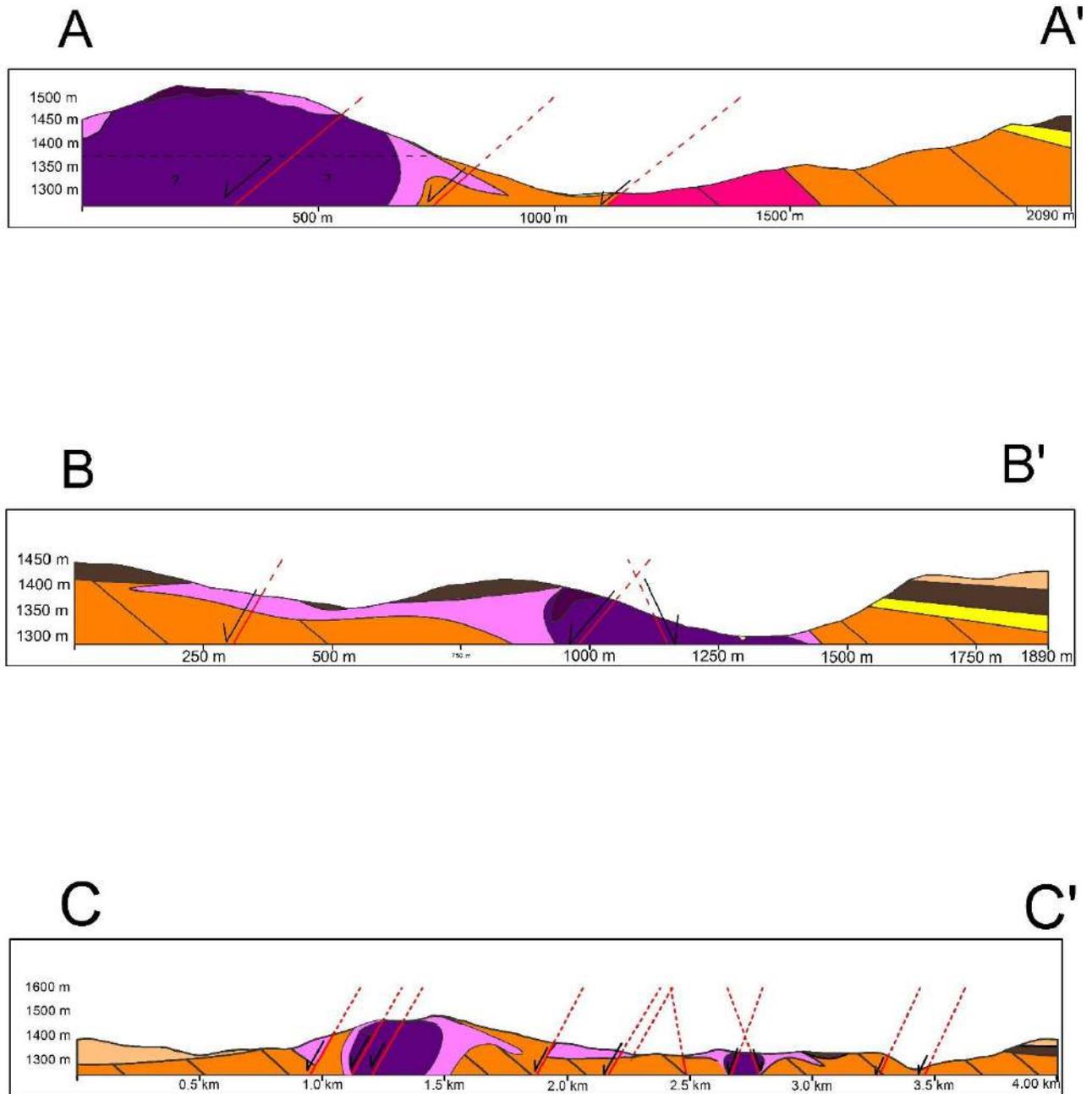
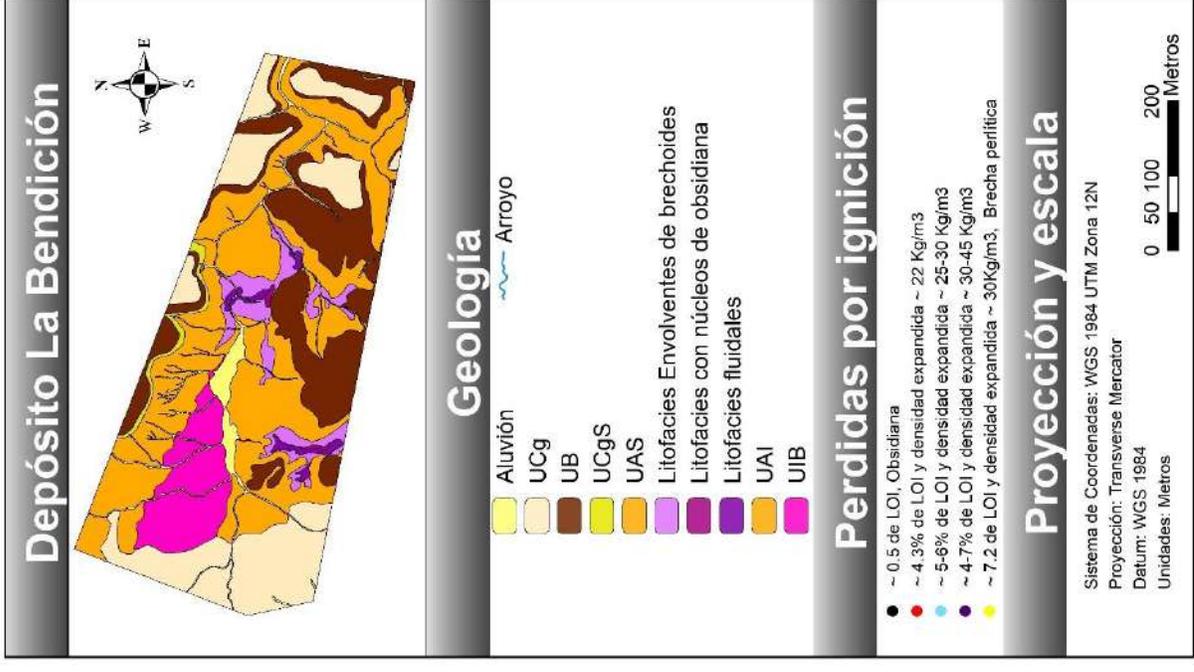
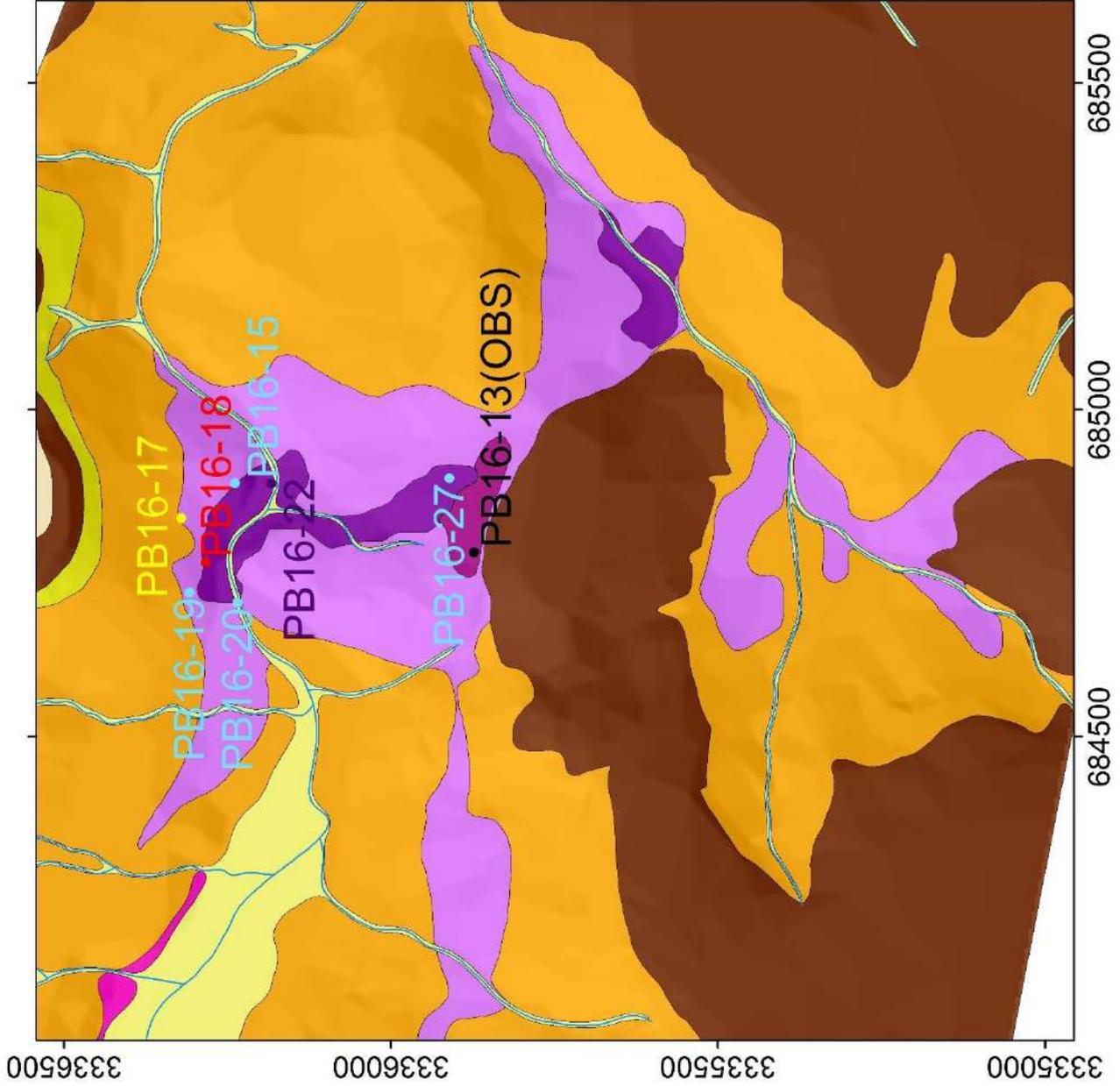
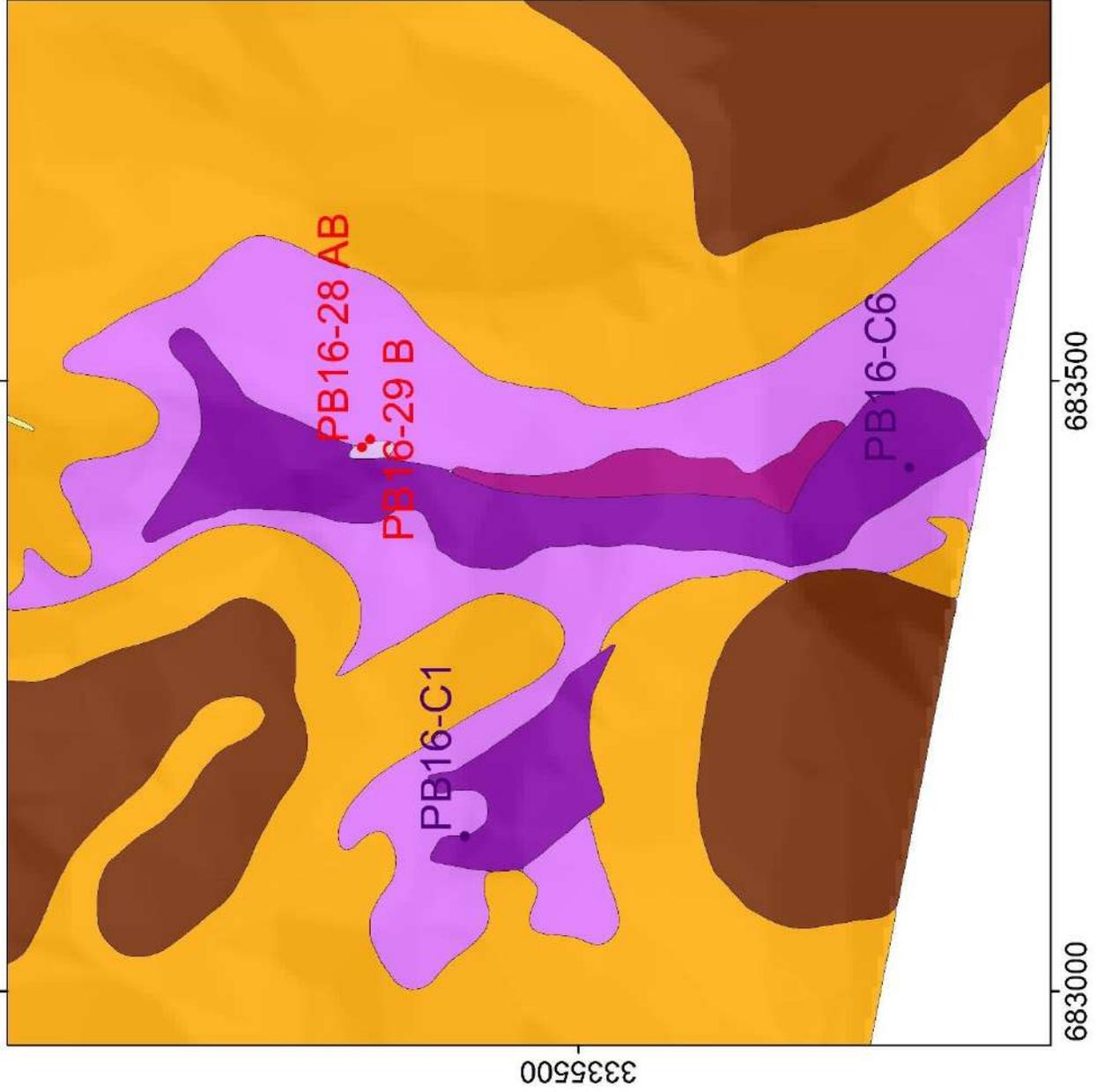
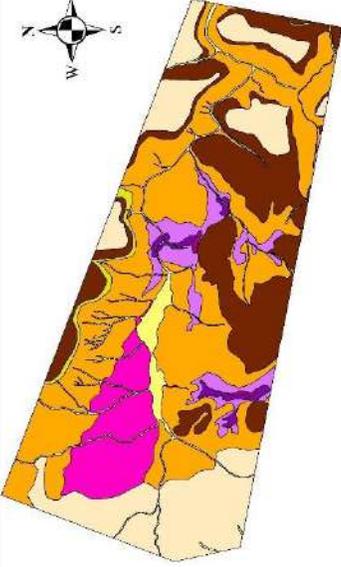


Figura 58. Secciones geológicas del rancho Babidanchi.





## Depósito Selene

### Geología

- Aluvión
- UB
- UAS
- Depósito perlitico de ladera
- Domo perlitico de brecha envolvente
- Perlita con núcleos de obsidiana
- Perlita fluidal

### Perdidas por ignición

- ~ 4.3% de LOI y densidad ~ 22 Kg/m<sup>3</sup>
- ~ 4.7% de LOI y densidad ~ 30-45 Kg/m<sup>3</sup>

### Proyección y escala

Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 12N  
 Proyección: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: Metros



0 25 50 100 Metros

## EXPANSIÓN

Muestra	PB16-C1	PB16-C6	PB16-15	PB16-17	PB16-18	PB16-19	PB16-20	PB16-22	PB16-27	PB16-28 AB	PB16-29 B
Rendimiento al horno (%)	93.32	84.58	90.58	86.42	90.42	86.46	87.98	91.38	90.28	87.60	89.68
Densidad expandida (lbs/ft3)	2.03	2.79	1.54	1.81	1.34	1.69	1.71	2.39	1.86	1.35	1.34
Densidad expandida (kg/m3)	32.52	44.69	24.67	28.99	21.46	27.07	27.39	38.28	29.79	21.62	21.46
Brillo promedio- viejo	63.8	65.8	73.0	74.4	74.7	68.2	79.2	72.3	74.6	67.2	72.6
Brillo promedio - nuevo	59.3	60.3	68.8	69.5	69.6	64.0	74.0	67.7	69.7	62.5	67.9
(%) Hundimientos - promedios 3 corridas	0.80	7.13	1.93	13.27	1.67	2.13	0.67	2.27	2.53	1.60	0.67
(%) Hundimientos Dev Std	0.20	0.50	0.23	1.22	0.23	0.31	0.12	0.42	0.76	0.35	0.31
Tyler Mesh #20 (% expandido retenido)	5.98	1.40	7.20	5.01	9.18	4.59	4.60	1.80	4.01	7.80	9.20
Tyler Mesh #30 (% expandido retenido)	22.11	11.20	24.60	16.43	24.75	18.36	21.80	20.96	22.85	22.20	28.00
Tyler Mesh #50 (% expandido retenido)	49.80	50.80	46.20	36.47	40.92	46.51	46.80	55.89	49.10	42.20	41.60
Tyler Mesh #70 (% expandido retenido)	11.95	18.20	10.80	19.24	11.98	13.17	11.60	11.58	13.43	11.40	8.60
Tyler Mesh #100 (% expandido retenido)	3.19	7.00	3.00	9.82	4.19	4.59	3.20	3.59	3.81	3.00	2.20
Tyler Mesh #140 (% expandido retenido)	2.19	4.60	1.40	4.41	3.19	5.19	4.20	1.80	2.61	4.40	2.60
Tyler Mesh Pan (% expandido retenido)	1.99	5.00	2.60	4.41	2.40	4.39	4.00	1.40	2.00	4.20	3.40
Sum (Porcentaje expandido retenido)	97.21	98.20	95.80	95.79	96.61	96.81	96.20	97.01	97.80	95.20	95.60

Tabla 4. Datos del certificado de expansión.

## GEOQUÍMICA

Muestra	PB16-C1	PB16-C6	PB16-15	PB16-17	PB16-18	PB16-19	PB16-20	PB16-22	PB16-27	PB16-28 AB	PB16-29 B	PB16-13(OBS)
SiO2	75.97	76.27	76.05	76.24	75.99	76.07	76.38	76.23	76.12	76.30	76.26	76.38
Al2O3	13.09	13.19	13.03	13.11	13.03	13.14	13.08	13.13	13.02	13.23	13.15	12.96
Fe2O3	1.37	1.10	1.42	1.25	1.27	1.24	1.15	1.11	1.33	1.14	1.17	1.17
CaO	0.78	1.21	1.08	1.44	0.92	1.10	0.95	1.26	1.19	0.73	0.75	0.80
MgO	0.14	0.33	0.27	0.49	0.21	0.32	0.21	0.25	0.32	0.14	0.16	0.15
Na2O	3.38	2.67	3.12	2.81	3.45	2.96	3.32	3.12	2.89	3.46	3.47	3.80
K2O	5.05	5.00	4.82	4.45	4.92	4.97	4.72	4.70	4.92	4.79	4.82	4.51
TiO2	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
P2O5	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
LOI	3.98	7.22	5.33	7.21	4.39	5.99	5.34	5.77	5.69	4.33	4.37	0.49
Total	98.07	100.56	100.68	101.56	101.25	100.89	100.65	99.55	99.48	98.95	98.38	101.67
Ba	964.00	965.00	982.00	978.00	978.00	956.00	938.00	937.00	956.00	930.00	939.00	989.00
Ce	65.10	65.10	63.80	64.10	66.10	63.40	63.90	63.60	64.00	61.90	63.50	67.50
Cr	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	9.00	9.00	10.00	9.00	9.00	10.00
Cs	4.71	4.82	10.80	13.55	6.34	4.79	14.45	5.34	5.79	4.49	4.44	4.81
Dy	2.32	2.15	2.21	2.14	2.18	2.15	2.15	2.20	2.18	2.05	2.18	2.31
Er	1.39	1.29	1.37	1.30	1.30	1.31	1.38	1.26	1.46	1.40	1.45	1.57
Eu	0.47	0.58	0.52	0.49	0.52	0.53	0.45	0.54	0.50	0.39	0.46	0.54
Ga	15.60	15.70	15.60	15.40	15.70	15.40	14.90	15.40	15.30	15.00	15.60	14.40
Gd	2.39	2.43	2.56	2.32	2.48	2.37	2.43	2.28	2.45	2.42	2.48	2.75
Hf	3.60	3.70	3.70	3.70	3.70	3.50	3.50	3.60	3.50	3.40	3.80	3.80
Ho	0.41	0.43	0.43	0.47	0.45	0.42	0.43	0.45	0.44	0.44	0.45	0.47
La	35.00	35.50	34.90	34.80	35.90	34.70	34.10	34.20	34.90	33.70	34.10	37.50
Lu	0.21	0.22	0.23	0.25	0.26	0.23	0.24	0.23	0.25	0.22	0.25	0.22
Nb	11.70	12.00	11.50	13.60	12.60	11.60	11.90	11.60	11.80	11.70	11.60	12.60
Nd	22.30	23.30	21.50	22.70	22.70	22.00	21.40	20.90	22.80	21.30	21.90	24.10
Pr	6.69	6.81	6.46	6.81	6.74	6.61	6.47	6.48	6.56	6.22	6.48	7.10
Rb	169.00	175.00	171.50	155.50	168.00	162.00	170.50	170.50	164.50	159.00	162.00	159.00
Sm	3.65	3.54	3.38	3.60	3.88	3.77	3.18	3.50	3.33	3.36	3.27	3.65
Sn	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00
Sr	140.50	190.50	331.00	580.00	207.00	190.00	228.00	164.00	194.50	132.50	136.50	145.50
Ta	1.10	1.20	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20
Tb	0.36	0.37	0.38	0.38	0.36	0.41	0.40	0.40	0.38	0.35	0.41	0.40
Th	16.05	16.60	15.80	15.50	16.10	15.95	16.15	15.65	16.00	15.20	15.70	15.75
Tm	0.21	0.24	0.20	0.20	0.20	0.23	0.18	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22

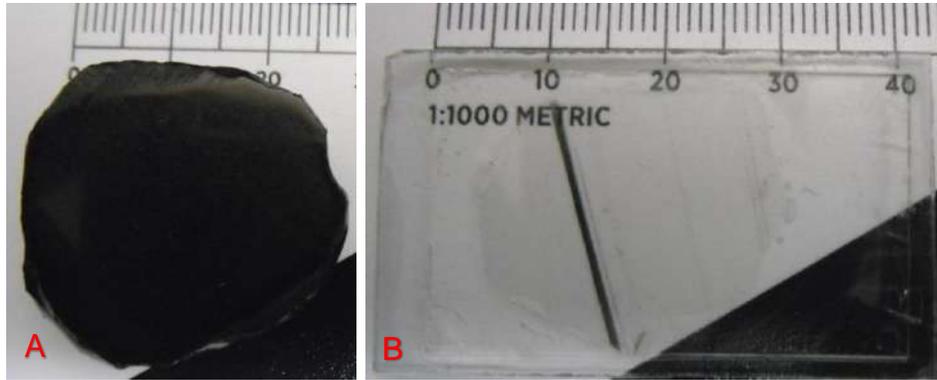
*Caracterización petrológica y origen de los yacimientos de perlita en Babidanchi, NE de Sonora, México:  
Implicaciones geoquímicas e interdependencia de variables en su expansión. Melgarejo-Joris E. 2019*

<b>U</b>	5.12	4.74	5.00	4.59	5.03	4.93	5.03	5.00	5.13	4.90	5.10	5.34
<b>V</b>	<5.00	<5.00	<5.00	7.00	5.00	<5.00	<5.00	<5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
<b>W</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Y</b>	14.10	13.90	13.90	14.20	14.50	13.80	14.00	13.90	14.20	13.60	13.80	14.60
<b>Yb</b>	1.70	1.49	1.44	1.60	1.52	1.53	1.60	1.59	1.57	1.69	1.50	1.47
<b>Zr</b>	114.00	114.00	111.00	111.00	113.00	110.00	109.00	110.00	113.00	110.00	114.00	127.00
<b>SubTotal</b>	94.09	93.34	95.35	94.35	96.86	94.90	95.31	93.78	93.79	94.62	94.01	101.18

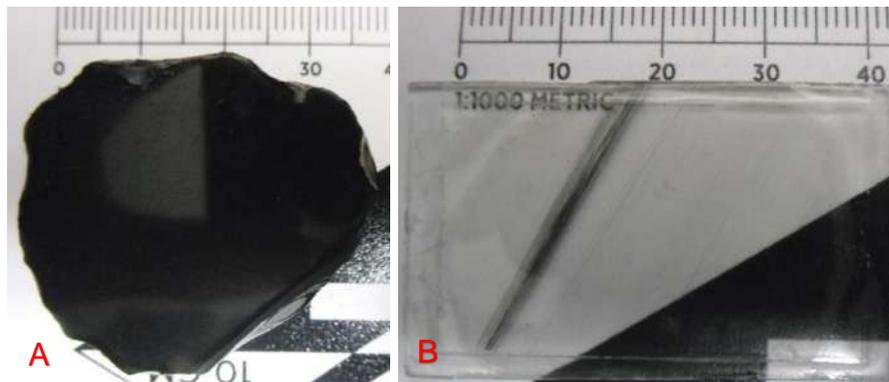
*Tabla 5. Datos geoquímicos del certificado de ALS Minerals.*

## FOTOGRAFÍAS

Las fotografías de las muestras y secciones delgadas se presentan en el mismo orden que en la petrografía.



Fotografía 1. La muestra de mano (A) **PB16-12** (marekanita) es de textura vítrea, y en la sección delgada (B) se observa una laminación densa de minerales opacos, y otras más difusas.



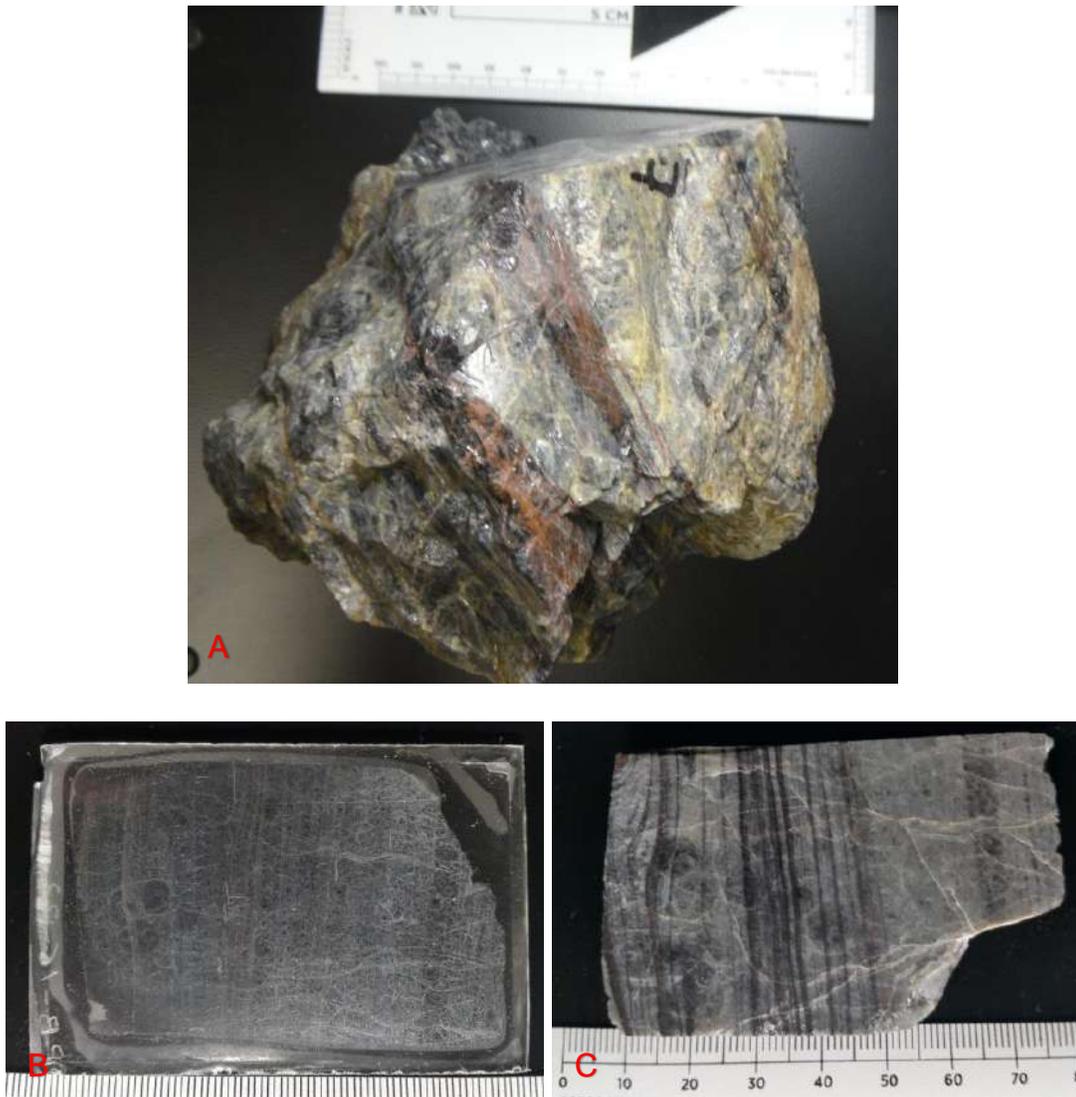
Fotografía 2. La muestra de mano (A) **PB16-13** (marekanita) es de textura vítrea, en la sección delgada (B) se observa una laminación densa y otras difusas compuestas de minerales opacos.



*Fotografía 3. En la muestra de mano (A) **PB16-05** se observa una textura fluidal con fractura concoide, la roca es marrón con porciones grises, en testigo (B) y sección delgada (C) se aprecia una fractura concoide bien desarrollada.*



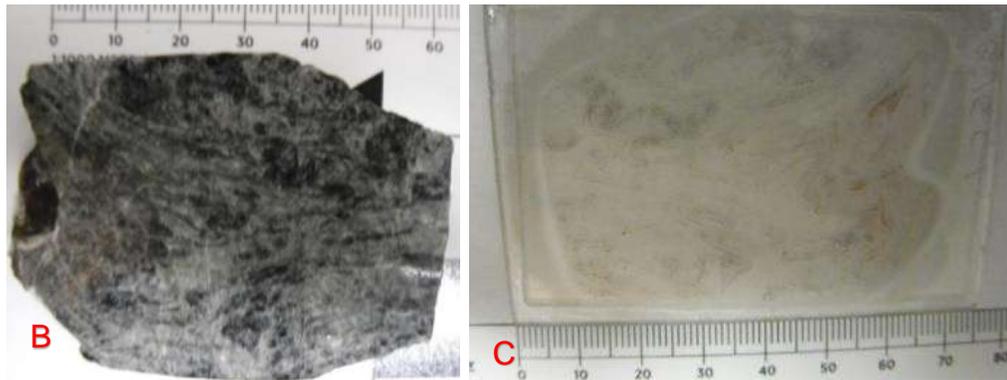
Fotografía 4. En la muestra de mano (A) **PB16-17** se observa una matriz desvitrificada con fragmentos perlíticos, en testigo (B) y sección delgada (C) se observa una matriz fina y fragmentos de pocos centímetros, se observa además una fractura concoide bien desarrollada, y pocas zeolitas.



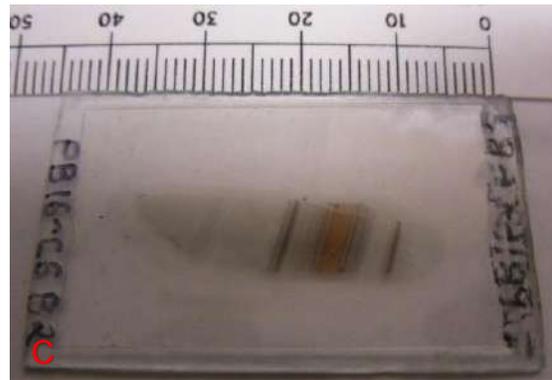
Fotografía 5. En la muestra de mano (A) **PB16-22** se observan laminaciones en colores oscuros y oxidados, en la sección delgada (B) y el testigo (C) se observa una ligera fractura concoide y laminaciones de minerales opacos.



Fotografía 6. En la muestra de mano (A) **PB16-29A** se observa una matriz vítrea con lustre turbio y laminaciones de minerales opacos, en el testigo (B) se aprecia una fractura concoide con textura fibrosa, y en sección delgada (C) es más notorio el desarrollo de la fractura concoide.



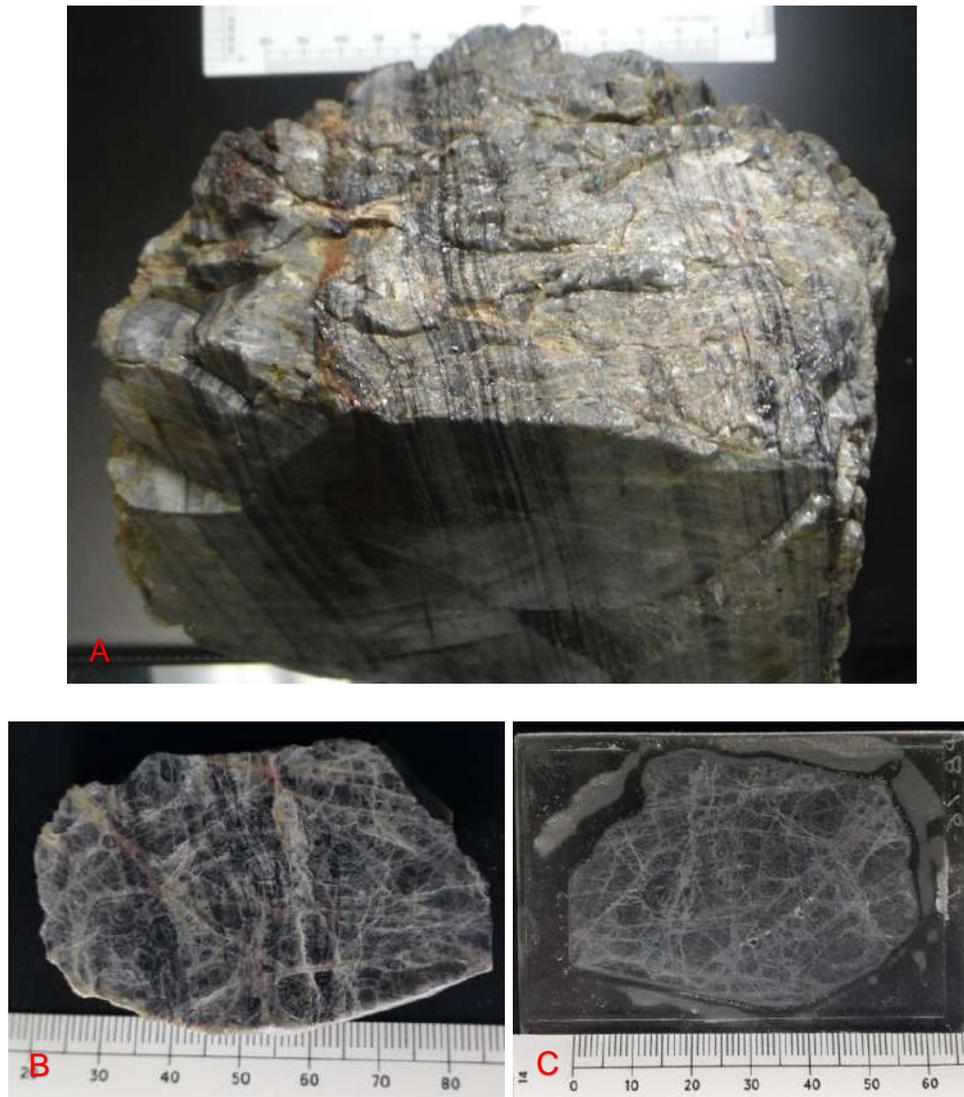
Fotografía 7. En la muestra de mano (A) **PB16-C1** se presenta una matriz vítrea con textura fluidal, en el testigo (B) se observan laminaciones contorsionadas, en sección delgada (C) se observan laminaciones formadas por minerales opacos.



Fotografía 8. La muestra de mano (A) **PB16-C6B2** presenta una textura vitrea con lustre opaco, en el testigo (B) se observan lineaciones de minerales oxidados, y en secciones delgada (C) se aprecian laminaciones de minerales oxidados y opacos.



*Fotografía 9. En la muestra de mano (A) **PB16-01** podemos observar una matriz vítrea con textura afanítica y fractura perlítica, en el testigo (B) se observa un lustre opaco, y en sección delgada (C) no se distingue la fractura concoide.*



Fotografía 10. En la muestra de mano (A) **PB16-27** se observa una matriz vítrea con laminaciones de minerales opacos, en el testigo (B) se observa fracturas con espesores de mayor grosor que la textura perlítica. En sección delgada (C) se observa el desarrollo de la textura perlítica.



*Fotografía 11. En la muestra de mano (A) **PB16-C6B** se observa una matriz vítrea con lustre opaco, en testigo (B) se observan minerales oxidados, y en sección delgada (C) se observa un ligero desarrollo de la textura perlítica.*

\*Esta muestra ha sido presentada anteriormente, pero la sección delgada fue tomada de otra porción de la misma roca.



Fotografía 12. En la muestra de mano (A) PB16-15 se observa una matriz vítrea con lustre brillante, en el testigo (B) se observa un fracturamiento con dirección preferencial, y en sección delgada (C) se observa el desarrollo de una textura perlítica.



*Fotografía 13. En la muestra de mano (A) **PB16-18** se observa una matriz vítrea con lustre brillante, se aprecia un buen desarrollo de la textura perlítica. En el testigo (B) se aprecian laminaciones opacas contorsionadas.*



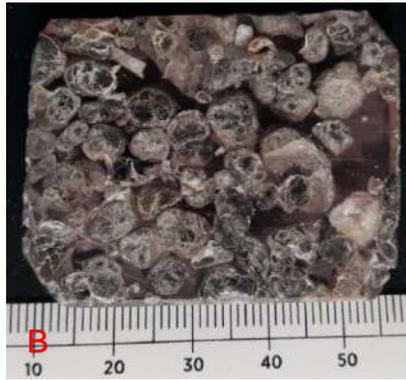
Fotografía 14. En la muestra de mano (A) **PB16-C6A** se observa una matriz vitrea con laminaciones de minerales opacos, en el testigo (B) se observa un lustre brillante, y en sección delgada (C) se observan laminaciones con leves desplazamientos por microfisuras.



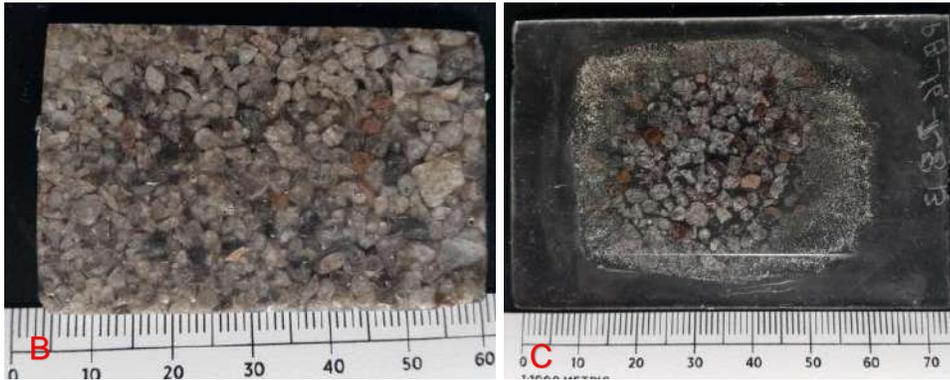
Fotografía 15. En la muestra de mano (A) **PB16-20** se observa una roca vitrea grisácea con rojizo, (B) el testigo muestra presenta un lustre vítreo y (C) en sección delgada se observa un buen desarrollo de la textura perlítica.



Fotografía 166. En la muestra de mano (A) **PB16-19** es de color gris claro, presenta laminaciones de minerales de óxido de Fe-Ti, (B) en el testigo se aprecia un lustre vítreo, laminaciones fluidales y una fractura concoide, y (C) en sección delgada de observa un buen desarrollo de la textura perlítica..



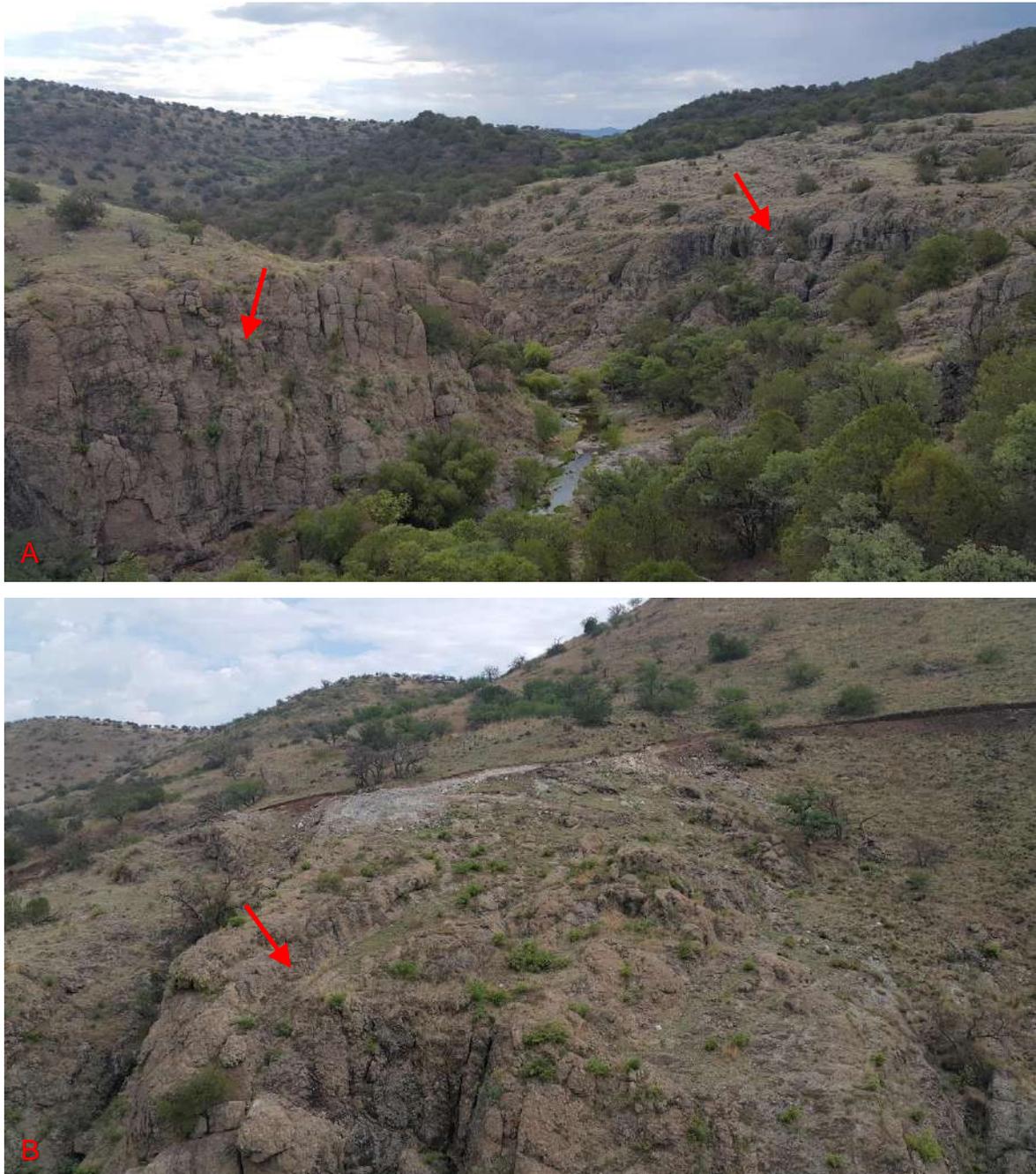
Fotografía 177. En la muestra de mano (A) **PB16-28A** se observa un material granulado de perlita en tamaños menores a 1.5 centímetros, en el testigo (B) se observan fragmentos granulares sumergidos en resina, y en sección delgada (C) se observan fragmentos perlíticos con laminaciones de minerales opacos y fayalita.



Fotografía 188. En la muestra de mano (A) **PB16-28B** se observa un material granulado de perlita en tamaños menores a 1 centímetros, en el testigo (B) se observan fragmentos granulares sumergidos en resina, y en sección delgada (C) se observan fragmentos perlíticos con laminaciones de minerales opacos y fayalita.



*Fotografía 199. (A) Perlita pulida en el arroyo Babidanchi, y (B) perlita pulida a los márgenes del arroyo Babidanchi.*



Fotografía 20. (A) Perlita a los márgenes del arroyo Babidanchi (tomada con vistas al oeste), y (B) perlita al norte del arroyo Babidanchi (tomada con vista al noroeste).



Fotografía 21. (A) Perlita intemperizada, y (B) perlita color marrón.



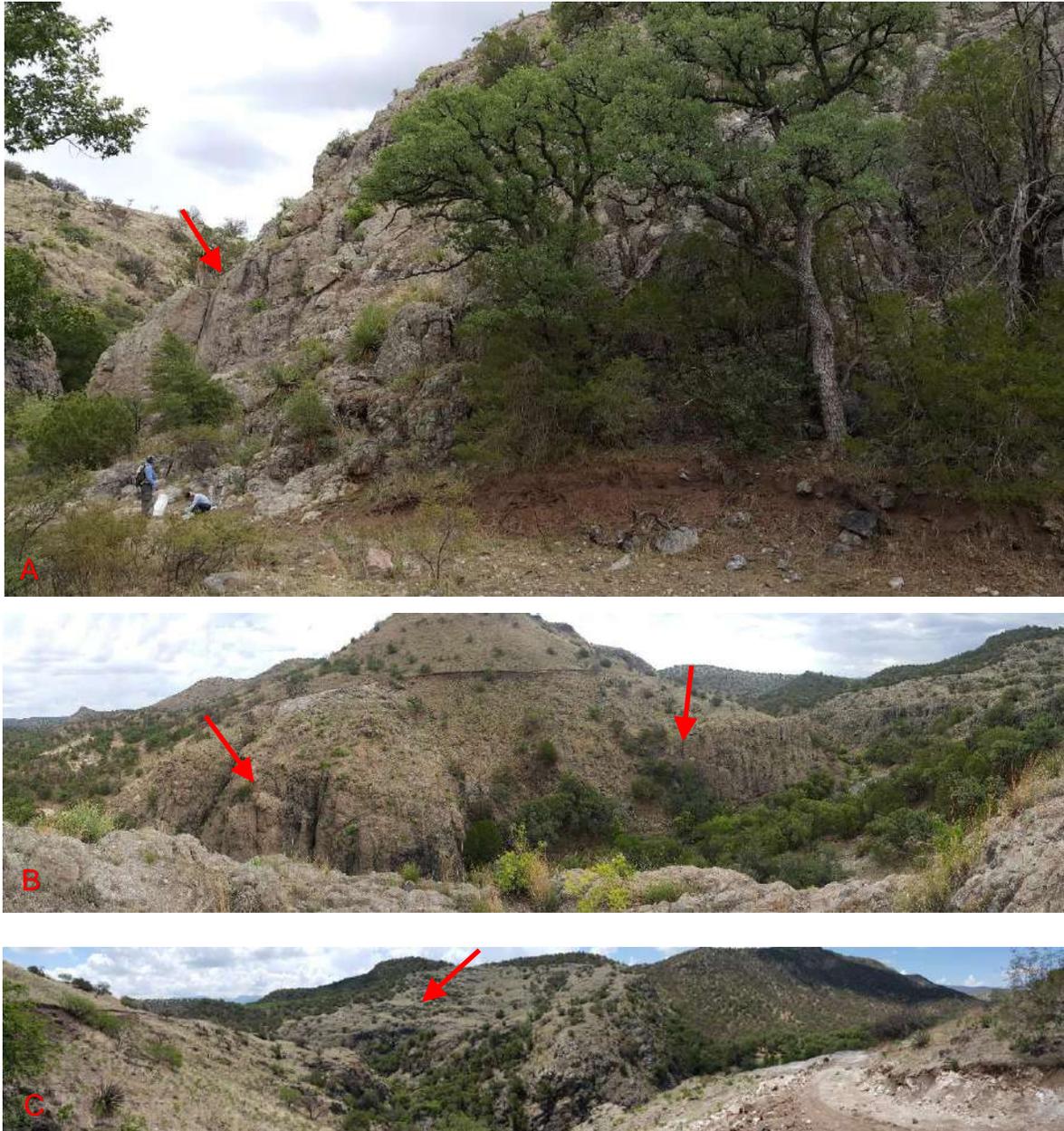
Fotografía 22. En **A** y **B** se observan marekanitas u obsidiana donde no fue efectiva la perlitización.



Fotografía 203. (A) Arroyo Babidanchi y perlita a sus márgenes, y (B) yacimiento de perlita "La Bendición".



*Fotografía 214. Yacimiento de perlita "La Bendición".*



Fotografía 225. (A) Base del yacimiento de perlita "La Bendición", (B) tomada con vistas al norte y (C) vista al sur desde lados opuestos del arroyo del yacimiento "La Bendición".



*Fotografía 236. Yacimiento de perlita "Selene".*



*Fotografía 247. (A) Yacimiento de perlita "Selene", y (B) gravilla de perlita en el yacimiento "Selene".*



*Fotografía 258. Gravilla de perlita en el yacimiento "Selene", en zona de falla.*



*Fotografía 269. Gravilla de perlita del yacimiento "Selene".*



Fotografía 30. Gravilla de perlita del yacimiento "Selene", en zona de falla.

Muestra	PB16-C1	PB16-C6	PB16-15
Texturas	Perlítica contorsionada	Perlítica laminar	Perlítica lustre vítreo
Minerales presentes	Magnetita, OxFe-Ti	Cuarzo, OxFe-Ti	OxFe-Ti
Material analizado	Perlita gris	Perlita gris	Perlita gris
Litofacies del depósito	Perlita fluidal	Perlita fluidal	Perlita fluidal
Depósito	Selene	Selene	La Bendición
Tipo de roca	Perlita	Perlita	Perlita
SiO <sub>2</sub>	0.9946	0.9985	0.9956
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0098	1.0180	1.0049
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1757	0.9464	1.2146
CaO	0.9692	1.5125	1.3500
MgO	0.9320	2.2407	1.8402
Na <sub>2</sub> O	0.8906	0.7030	0.8211
K <sub>2</sub> O	1.1203	1.1080	1.0686
TiO <sub>2</sub>	0.9320	0.9396	0.9201
MnO	1.0754	1.0842	1.0617
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.0754	1.0842	1.0617
LOI	8.1224	14.7347	10.8776
Ba	0.9747	0.9757	0.9929
Ce	0.9644	0.9644	0.9452
Cs	0.9792	1.0021	2.2453
Dy	1.0043	0.9307	0.9567
Er	0.8854	0.8217	0.8726
Eu	0.8704	1.0741	0.9630
Ga	1.0833	1.0903	1.0833
Gd	0.8691	0.8836	0.9309
Hf	0.9474	0.9737	0.9737
Ho	0.8723	0.9149	0.9149
La	0.9333	0.9467	0.9307
Lu	0.9545	1.0000	1.0455
Nb	0.9286	0.9524	0.9127
Nd	0.9253	0.9668	0.8921
Pr	0.9423	0.9592	0.9099
Rb	1.0629	1.1006	1.0786
Sm	1.0000	0.9699	0.9260
Sr	0.9656	1.3093	2.2749
Ta	0.9167	1.0000	0.9167
Tb	0.9000	0.9250	0.9500
Th	1.0190	1.0540	1.0032
Tm	0.9545	1.0909	0.9091
U	0.9588	0.8876	0.9363
Y	0.9658	0.9521	0.9521
Yb	1.1565	1.0136	0.9796
Zr	0.8976	0.8976	0.8740
Sn	1.0000	0.5000	0.5000

Muestra	PB16-17	PB16-18	PB16-19
Texturas	Matriz desvitrificada	Perlítica de lustre vítreo	Perlítica lustre vítreo
Minerales presentes	Cuarzo y zeolita	Fayalita, OxFe-Ti	Magnetita, OxFe-Ti
Material analizado	Brecha perlítica	Perlita gris	Perlita gris y rojo
Litofacias del depósito	Cobertura perlítica	Perlita fluidal	Perlita fluidal
Depósito	La Bendición	La Bendición	La Bendición
Tipo de roca	Brecha	Perlita	Perlita
SiO <sub>2</sub>	0.9981	0.9949	0.9959
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0117	1.0051	1.0135
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0732	1.0893	1.0664
CaO	1.8018	1.1482	1.3692
MgO	3.2910	1.3933	2.1327
Na <sub>2</sub> O	0.7406	0.9089	0.7803
K <sub>2</sub> O	0.9861	1.0908	1.1014
TiO <sub>2</sub>	0.9301	0.9753	0.9242
MnO	1.0732	1.0450	1.0664
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.5366	0.5225	0.5332
LOI	14.7143	8.9592	12.2245
Ba	0.9889	0.9889	0.9666
Ce	0.9496	0.9793	0.9393
Cs	2.8170	1.3181	0.9958
Dy	0.9264	0.9437	0.9307
Er	0.8280	0.8280	0.8344
Eu	0.9074	0.9630	0.9815
Ga	1.0694	1.0903	1.0694
Gd	0.8436	0.9018	0.8618
Hf	0.9737	0.9737	0.9211
Ho	1.0000	0.9574	0.8936
La	0.9280	0.9573	0.9253
Lu	1.1364	1.1818	1.0455
Nb	1.0794	1.0000	0.9206
Nd	0.9419	0.9419	0.9129
Pr	0.9592	0.9493	0.9310
Rb	0.9780	1.0566	1.0189
Sm	0.9863	1.0630	1.0329
Sr	3.9863	1.4227	1.3058
Ta	0.9167	0.9167	0.9167
Tb	0.9500	0.9000	1.0250
Th	0.9841	1.0222	1.0127
Tm	0.9091	0.9091	1.0455
U	0.8596	0.9419	0.9232
Y	0.9726	0.9932	0.9452
Yb	1.0884	1.0340	1.0408
Zr	0.8740	0.8898	0.8661
Sn	0.5000	0.5000	0.5000

Muestra	PB16-20	PB16-22	PB16-27
Texturas	Perlítica de lustre vítreo	Perlítica quebradiza	Perlítica laminar
Minerales presentes	Magnetita, OxFe-Ti	Magnetita, OxFe-Ti, cuarzo	Cuarzo, OxFe-Ti
Material analizado	Perlita gris y rojo	Perlita gris	Perlita gris
Litofacies del depósito	Perlita fluidal	Perlita fluidal	Perlita fluidal
Depósito	La Bendición	La Bendición	La Bendición
Tipo de roca	Perlita	Perlita	Perlita
SiO <sub>2</sub>	1.0000	0.9980	0.9965
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0092	1.0132	1.0049
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9809	0.9511	1.1430
CaO	1.1799	1.5720	1.4786
MgO	1.4158	1.6546	2.1580
Na <sub>2</sub> O	0.8738	0.8206	0.7615
K <sub>2</sub> O	1.0456	1.0413	1.0908
TiO <sub>2</sub>	0.9203	0.9352	0.9351
MnO	1.0619	1.0791	1.0790
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.5309	0.5396	0.5395
LOI	10.8980	11.7755	11.6122
Ba	0.9484	0.9474	0.9666
Ce	0.9467	0.9422	0.9481
Cs	3.0042	1.1102	1.2037
Dy	0.9307	0.9524	0.9437
Er	0.8790	0.8025	0.9299
Eu	0.8333	1.0000	0.9259
Ga	1.0347	1.0694	1.0625
Gd	0.8836	0.8291	0.8909
Hf	0.9211	0.9474	0.9211
Ho	0.9149	0.9574	0.9362
La	0.9093	0.9120	0.9307
Lu	1.0909	1.0455	1.1364
Nb	0.9444	0.9206	0.9365
Nd	0.8880	0.8672	0.9461
Pr	0.9113	0.9127	0.9239
Rb	1.0723	1.0723	1.0346
Sm	0.8712	0.9589	0.9123
Sr	1.5670	1.1271	1.3368
Ta	0.9167	0.9167	0.9167
Tb	1.0000	1.0000	0.9500
Th	1.0254	0.9937	1.0159
Tm	0.8182	0.9091	0.9091
U	0.9419	0.9363	0.9607
Y	0.9589	0.9521	0.9726
Yb	1.0884	1.0816	1.0680
Zr	0.8583	0.8661	0.8898
Sn	0.5000	0.5000	0.5000

Muestra	PB16-28AB	PB16-29B	PB16-13
Texturas	Perlítica delezada	Perlítica de lustre vítreo	Afanítica
Minerales presentes	Magnetita, OxFe-Ti	Cuarzo, OxFe-Ti	Escasa magnetita
Material analizado	Gravilla de perlita	Perlita gris	Riolita
Litofacies del depósito	Perlita fluidal	Perlita fluidal	Obsidiana
Depósito	Selene	Selene	La Bendición
Tipo de roca	Gravilla	Perlita	obsidiana
SiO <sub>2</sub>	0.9989	0.9984	1.0000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0205	1.0148	1.0000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9789	1.0035	1.0000
CaO	0.9111	0.9303	1.0000
MgO	0.9269	1.0765	1.0000
Na <sub>2</sub> O	0.9108	0.9139	1.0000
K <sub>2</sub> O	1.0625	1.0694	1.0000
TiO <sub>2</sub>	0.9982	1.0047	1.0000
MnO	1.0695	1.0765	1.0000
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.5348	0.5382	1.0000
LOI	8.8367	8.9184	1.0000
Ba	0.9403	0.9494	1.0000
Ce	0.9170	0.9407	1.0000
Cs	0.9335	0.9231	1.0000
Dy	0.8874	0.9437	1.0000
Er	0.8917	0.9236	1.0000
Eu	0.7222	0.8519	1.0000
Ga	1.0417	1.0833	1.0000
Gd	0.8800	0.9018	1.0000
Hf	0.8947	1.0000	1.0000
Ho	0.9362	0.9574	1.0000
La	0.8987	0.9093	1.0000
Lu	1.0000	1.1364	1.0000
Nb	0.9286	0.9206	1.0000
Nd	0.8838	0.9087	1.0000
Pr	0.8761	0.9127	1.0000
Rb	1.0000	1.0189	1.0000
Sm	0.9205	0.8959	1.0000
Sr	0.9107	0.9381	1.0000
Ta	0.9167	0.9167	1.0000
Tb	0.8750	1.0250	1.0000
Th	0.9651	0.9968	1.0000
Tm	0.9091	0.9091	1.0000
U	0.9176	0.9551	1.0000
Y	0.9315	0.9452	1.0000
Yb	1.1497	1.0204	1.0000
Zr	0.8661	0.8976	1.0000
Sn	0.5000	0.5000	1.0000

Tablas 5. Datos de las perlitas normalizadas a los valores de la obsidiana