



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS
GEOTERMIA

PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-ROCA EN EL RESERVORIO GEOTÉRMICO DE
ALTA ENTALPÍA LOS HUMEROS, PUEBLA, MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
DAVID YÁÑEZ DÁVILA

Director de tesis:
Dr. Eduardo González Partida
Centro de Geociencias

Comité Tutorial:

Presidente: Dr. Luca Ferrari (Centro de Geociencias, UNAM)
Secretario: Dr. Eduardo González Partida (Centro de Geociencias, UNAM)
Vocales: Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez (Instituto de Energías Renovables, UNAM)
Dr. Carlos Canet Miquel (Instituto de Geofísica, UNAM)
Dr. José Manuel Romo Jones (Geofísica Aplicada, CICESE)

Querétaro, enero 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Querétaro, México
2016

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”

**DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL
O PARCIAL**

DEDICATORIA

*A quien estuvo por las mañanas, tardes y noches, quien compartió aquellos, mis momentos,
mis sentires, a ti la mujer de mi vida, de mi amor...Mi Marijo.*

*A quien me instruyo en lo más profundo de mi ser, para ser libre y consiente,
a ti mi razón de ser y estar...Mi Madre.*

*A quien son mis dos mejores amigos que la vida me dio para ser
mi inspiración para seguir creciendo... Mis Hermanos.*

*A quien son los pilares que me sostiene, y que me hacen mirar,
en una sola dirección, hacia arriba...Mi Familia.*

*A quienes sin su existencia este mundo sería un lugar
monótono y gris, a ustedes...Mis Amigos*

*A quien está presente aquí, y en todas partes, quien
sin él no hubiera logrado nada...Mi Dios*

Gracias...

AGRADECIMIENTOS

Primeramente al Dr. Eduardo González Partida por invitarme a participar en su equipo de trabajo en el área de geotermia, por confiar en mi para realizar esta tesis y por compartir su conocimiento.

De igual manera a mi comité tutorial Dr. Luca Ferrari, Dr. Edgar Santoyo, Dr. Carlos Canet y Dr. José Manuel Romo, por aceptar formar parte de mi comité y sus observaciones acertadas para mejorar mi trabajo de tesis.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyar mis estudios de maestría otorgándome una beca para continuar mi desarrollo profesional.

Agradezco a mis compañeros geólogos que me ayudaron en el arduo trabajo de campo, Erick Gutiérrez, Carmen Romero, Marco Noé Yáñez, Erick Díaz, Luis González, Gonzalo Cid, Oscar Martínez, Vania Ferrer, Daniel Díaz, Juan Romero y Angélica Díaz.

A mis compañeros de generación, en especial a Cynthia, Ángeles, Aurora, Arlette, Erick, Lorena, Félix, Daniela.

Agradezco enormemente la disposición y el apoyo que me brindó el Dr. Juan Pablo Bernal para poder llevar a cabo los análisis y comprensión de FRX-ED, a la M. en C. Ofelia Pérez Arvizu por las asesorías y el apoyo en el laboratorio de estudios isotópicos para la realización de los análisis de ICP-MS, de igual manera agradezco todo el apoyo y ayuda que me brindó Erick Hugo Díaz Carreño para la realización de diversas imágenes y análisis, a Cynthia Córdova Molina por sus objetivas observaciones, al laboratorio de Laminación en especial a Juan Tomás Vázquez por elaborar las láminas delgadas, al Dr. Alex Iriondo por acertado razonamiento geológico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la Secretaría de Energía (SENER), que a través del Fondo Sectorial CONACyT-SENER Sustentabilidad Energética, creó el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIEGEO) de donde se desprende el proyecto PO-8 bajo la numeración 207032 el cual lleva como título "Desarrollo, implementación y aplicación de metodologías analíticas de procesos de interacción agua-roca en reservorios geotérmicos de baja y alta entalpía: Aplicación en campos Mexicanos", de donde se desprendió apoyo para la elaboración de esta tesis.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	10
ABSTRACT.....	11
I-. GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA	12
I.I PANORAMA GEOTÉRMICO EN LA ACTUALIDAD	12
I.II PRODUCCIÓN MUNDIAL	14
II-. ESTADO ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO	15
II.I MÉXICO A NIVEL MUNDIAL	15
II.II MÉXICO Y LA GEOTERMIA	16
II.III MÉXICO, FUTURAS EXPECTATIVAS EN GEOTERMIA.....	19
III. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	22
III.I JUSTIFICACIÓN	22
III.II OBJETIVOS	22
III.II.I OBJETIVOS GENERALES	22
III.II.II OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
IV. GEOLOGÍA LOCAL, REGIONAL Y ELEMENTOS TECTÓNICOS RELACIONADOS AL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS	23
IV.I ESBOZO DEL CINTURÓN VOLCÁNICO TRANS-MEXICANO	23
IV.II GEOLOGÍA REGIONAL Y ELEMENTOS TECTÓNICOS.	25
IV.III GEOLOGÍA LOCAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS.....	28
V. INTERACCIÓN AGUA-ROCA.....	31
V.I COMPORTAMIENTO DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL SUPERFICIAL	32
V.II COMPORTAMIENTO DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL PROFUNDA	33
V.III PETROGRAFÍA Y MINERAGRAFÍA	34
V.IV INCLUSIONES FLUIDAS.....	35
V.V MOVILIDAD ELEMENTAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE GRANT (1986).....	38
VI MÉTODOS Y MATERIALES.	40
VI.I TRABAJO DE CAMPO.....	40
VI.II TRABAJO DE LABORATORIO	40
VI.III MÉTODOS ANALÍTICOS	41
VI.III.I FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX-WD)	41
VI.III.II FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX-ED).....	42
VI.III.III ESPECTROSCOPIA DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCIDO (ICP-MS)	43
VI.III.IV PETROGRAFÍA Y MINERALOGÍA	43
VI.III.V ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA DE INFRARROJO DE ONDA CORTA (SWIR)	43
VI.III.VI DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)	44
VI.III.VII INCLUSIONES FLUIDAS	44
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
VII.I INCLUSIONES FLUIDAS.....	45
VII.I.I EVOLUCIÓN TÉRMICA DE LOS FLUIDOS	54
VII.II PETROGRAFÍA Y MINERAGRAFÍA	58
VII.III CARACTERIZACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL SUPERFICIAL.....	62
VII.III.I DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DXR)	62
VII.III.II ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA DE ONDA CORTA (SWIR)	64

VII.IV	GEOQUÍMICA.....	69
VII.IV.I	ELEMENTO MAYORES DE LA ALTERACIÓN HIDROTÉRMAL SUPERFICIAL	69
VII.IV.I.I	ÍNDICES DE ALTERACIÓN.....	69
VII.IV.I.II	DIAGRAMAS DE VARIACIÓN DE ELEMENTOS MAYORES	71
VII.IV.II	ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS DE LA ALTERACIÓN HIDROTÉRMAL SUPERFICIAL	75
VII.IV.II.I	CLASIFICACIÓN QUÍMICA DE ROCAS	75
VII.IV.II.II	DIAGRAMAS MULTIELEMENTOS.....	77
VII.IV.II.III	DIAGRAMAS NORMALIZADOS DE REE.....	79
VII.V	FLUORESCENCIA DE RAYOS X (ED-FRX).....	82
VII.V.I	DETERMINACIÓN DE LA MOVILIDAD ELEMENTAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE GRANT (1986).....	85
VII.V.II	MÉTODO DE CORRELACIÓN GEOQUÍMICA BIVARIABLE.....	94
VII	INTERPOLACIÓN DE LOS DATOS MEDIANTE EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN KRIGING ORDINARIO.....	97
VIII	CONCLUSIONES	107
	REFERENCIAS.....	110
	ANEXOS I.....	121
	ANEXOS II.....	125
	ANEXOS III.....	133
	ANEXOS IV.....	142
	ANEXOS V.....	144
	ANEXOS VI.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Cantidades estimadas de la producción global de electricidad para fines del 2016 (Fuentes diversas).....	12
Figura 2.- Capacidad geotérmica instalada para diciembre del 2015 (13.2 GW) en los principales países del mundo.....	14
Figura 3.- Capacidad geotérmica instalada en México para diciembre del 2015.....	15
Figura 4.- Generación de electricidad de las diferentes fuentes para el año 2015 en México, donde el 77.3% siguen siendo fuentes no renovables y solo el 22.7 % son fuentes renovables.....	16
Figura 5.- Vistas panorámicas de los cuatro principales campos geotérmicos en México: a) Cerro Prieto en Baja California Norte, b) Los Azufres en Michoacán, c) Los Humeros en Puebla y d) Tres Vírgenes en Baja California Sur..	18
Figura 6.- Publicaciones científicas desde 1982-2012 referente a las energías renovables en México.....	19
Figura 7.- Energía geotérmica adicionada en el 2015 en el mundo.....	20
Figura 8.- Mapa de manifestaciones geotérmicas del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano.....	21
Figura 9.- Distribución del vulcanismo de la CVTM y composición de los productos de los cuatro episodios que se ha reconocido en su evolución.....	24
Figura 10.- Geología regional del campo geotérmico Los Humeros, Puebla.....	27
Figura 11.- Columna Litoestratigrafía del campo Geotérmico Los Humeros, mostrando la edad de las rocas, la alteración de la roca y los principales minerales de alteración.....	30
Figura 12.- Paragénesis de minerales de alteración transparentes y opacos del campo geotérmico Los Humeros....	35
Figura 13.- Temperatura de fusión (-T _m) contra temperatura de homogenización (T _h) de las inclusiones fluidas de 11 pozos del campo geotérmico Los Humeros.....	37
Figura 14.- Plano Geológico Local del Campo Geotérmico Los Humeros.....	41
Figura 15.- Microfotografía del pozo H-41, se observan diferentes fases de las IF.....	49
Figura 16.- Microfotografía del pozo H-42 donde se observan IF en diferentes minerales huésped.....	49
Figura 17.- Microfotografía del pozo H-43 a una profundidad de 500 m de la muestra, cuyo mineral huésped es un cuarzo.....	51
Figura 18.- Diagrama bivalente donde se grafica la temperatura de homogenización contra la salinidad de los pozos H-8, H-15, H-17, H-19, H-29, H-39 y H40.....	50
Figura 19.- Diagrama bivalente donde se grafica la temperatura de homogenización contra la salinidad de los pozos H-41, H-42 y H-43.....	51
Figura 20.- Diagrama bivalente donde se grafica la profundidad estimada vs la profundidad real de los pozos H-4, H-15, H-16, H-17, H-29, H-39, H-40, H-41, H-42 y H-43.....	53
Figura 21.- Isotermas de IF y Temperaturas Estabilizadas de la sección longitudinal A-A' de N-S del CGH.....	55
Figura 22.- Isotermas de IF y Temperaturas Estabilizadas de la sección longitudinal B-B' de W-E del CGH.....	57
Figura 23.- Microfotografías de la muestra GH-1 (toba cristalina) perteneciente al pozo H-5 a 325 m de profundidad.....	59
Figura 24.- Microfotografías de la muestra GH-6 (andesita) perteneciente al pozo H-25 a 2300 m de profundidad....	59

Figura 25.- Microfotografías de la muestra GH-13 (andesita) perteneciente al pozo H-39 a 1800 m de profundidad.	60
Figura 26.- Microfotografías de la muestra GH-4 (andesita) perteneciente al pozo H-23 a 2496 m de profundidad...	60
Figura 27.- Zonamiento mineralógico de minerales de alteración transparentes y opacos del campo geotérmico Los Humeros.....	61
Figura 28.- Espectros representativos de los principales minerales de alteración obtenidos por difracción de rayos X (DRX) de las 12 muestras especiales de rocas alteradas del CGLH.....	63
Figura 29.- Espectros representativos de los principales minerales de alteración obtenidos por espectroscopia de reflectancia (SWIR) de las 12 muestras de rocas alteradas del CGLH.....	67
Figura 30.- Fotografías de muestras especiales, EG-01, 02, 03, 04, 07, 08, 10, 11 y 12.....	68
Figura 31.- Diagramas de variación Harker de elementos mayores vs SiO ₂ , mostrando la relación entre las rocas alteradas e inalteradas.....	73
Figura 32.- Diagrama de clasificación para rocas alteradas Nb/Y vs Zr/Ti (Winchester y Floyd, 1977).....	76
Figura 33.- Diagrama multielementos normalizados a manto primitivo de las muestras alteradas (líneas de color) con respecto a su roca inalterada (línea negra) del CGLH (Sun y McDonough, 1989).....	78
Figura 34-a.- Diagrama de REE normalizados a condrita de las muestras alteradas (líneas de color) con respecto a su roca inalterada (línea negra) del CGLH (Sun y McDonough, 1989.....	80
Figura 34-b y c.- Diagrama de REE normalizados a condrita de las muestras alteradas (líneas de color) con respecto a su roca inalterada (línea negra) del CGLH (Sun y McDonough, 1989.....	81
Figura 35.- Balance de Masas de la unidad litológica basaltos de olivino.....	89
Figura 36.- Balance de Masas de la unidad litológica andesita – basalto.....	90
Figura 37.- Balance de Masas de la unidad litológica depósitos piroclástico.....	91
Figura 38.- Coeficientes de correlación bivariable del Si y Al con respectos a los elementos mayores y traza de la unidad litológica basaltos de olivino del CGH.....	94
Figura 39.- Coeficientes de correlación bivariable del Si y Al con respectos a los elementos mayores y traza de la unidad litológica andesita - basalto del CGH.....	95
Figura 40.- Coeficientes de correlación bivariable del Si y Al con respectos a los elementos mayores y traza de la unidad litológica identificada como depósitos piroclásticos del CGH.....	96
Figura 41.- Diagrama de flujo que sintetiza el procedimiento estadístico que se llevó a cabo para el análisis espacial de los datos obtenido mediante el balance de masas de las muestras locales del CGH.....	98
Figura 42.- Parámetros geoquímicos de una distribución normal.....	98
Figura 43-a.- Anomalías geoquímicas predominantemente positivas del CGH de Torio.....	99
Figura 43-b.- Anomalías geoquímicas predominantemente positivas del CGH de Rubidio.....	100
Figura 43-c.- Anomalías geoquímicas predominantemente positivas del CGH de Niobio.....	101
Figura 44-a.- Anomalías geoquímicas predominantemente negativas del CGH de Aluminio.....	103
Figura 44-b.- Anomalías geoquímicas predominantemente negativas del CGH de Calcio.....	104
Figura 44-c.- Anomalías geoquímicas predominantemente negativas del CGH de Hierro.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Principales Instituciones por número de publicaciones desde 1982-2012.....	19
Tabla 2.- Unidades litológicas del subsuelo propuestas para el campo geotérmico Los Humeros.....	29
Tabla 3.- Estudios de Inclusiones Fluidas del campo geotérmico Los Humeros desde 1985-2016.....	45
Tabla 4.- Numero de pozo y profundidad de las muestras analizadas mediante petrografía y mineragrafía.....	58
Tabla 5.- Síntesis del análisis petrográfico y mineragráficos de diversas muestras del CGH.....	58
Tabla 6.- Composición mineralógica obtenida por espectroscopia de reflectancia de onda corta (SWIR) y difracción de rayos X (DRX).....	62
Tabla 7.- Ocurrencia de los principales minerales de alteración del CGLH en base a los obtenidos por espectroscopia de reflectancia de onda corta (SWIR) y difracción de rayos X (DRX).....	65
Tabla 8.- Composición de elementos mayores de las 15 muestras de roca alterada de superficie. Las muestras en azul corresponden a rocas inalteradas.....	69
Tabla 9.- Índice Químico de Alteración (IQA) de las 12 muestras superficiales de alteración	70
Tabla 10.- Índice de Silicificación (IS) de las 15 muestras superficiales de alteración.....	70
Tabla 11.- Elementos Mayores de las muestras de roca alterada (RA) de superficie y su correspondiente roca inalterada (RI).....	71
Tabla 12.- Composición de elementos traza de las 15 muestras de roca de superficie. De EG-01 a EG- 12 corresponden a rocas alteradas, de EG- 13 a EG-15 a rocas inalteradas.....	75
Tabla 13.- Composición de elementos de tierra raras (REE) de las 12 muestras de roca alterada de superficie.....	80
Tabla 14.- Análisis por FRX-ED de las muestras regionales del CGH.....	83
Tabla 15.- Análisis por FRX-ED de las muestras Locales del CGH.....	84
Tabla 16.- Resultados del Balance de Masas de las muestras regionales del CGH.....	87
Tabla 17.- Resultados del Balance de Masas de las muestras locales del CGH.....	88
Tabla 18.- Resultados del Balance de Masas de las principales litologías superficiales de las zonas productoras del CGH.....	93

RESUMEN

Un estudio geoquímico de balance de masas, junto a otros de carácter multidisciplinario (inclusiones fluidas, petrográficos, análisis cualitativos de la alteración hidrotermal y correlaciones geoquímicas bivariantes) permitieron evaluar los procesos de interacción agua-roca dentro del campo geotérmico de Los Humeros (CGH). Las inclusiones fluidas (IF) medidas en los pozos H-41, H-42 y H-43 permitieron determinar una zona con la mayor salinidad en el CGH (hasta 12.86 % en peso eq. de NaCl), lugar donde se muestra una área con IF en estado crítico a partir de 1,815 m de profundidad (H-43). Mediante el uso de isotermas de las temperaturas de homogenización de las IF y temperaturas estabilizadas se determinó que el CGH muestra un ligero enfriamiento térmico. El zoneamiento mineralógico de la alteración hidrotermal del subsuelo se dividió en cuatro zonas: zona I argílica (<400m), zona II propilítica, zona III con asociaciones paragenéticas de alta acidez y la zona IV con alteración hidrotermal tipo skarn (>1,800m).

La alteración superficial del CGH varía de argílica a argílica avanzada, argílica avanzada ácido – sulfato y alteración silícica, donde los elementos mayores como el TiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO , Na_2O y K_2O mostraron un enriquecimiento con respecto al SiO_2 y solo el Fe_2O_{3T} exhibió empobrecimiento. Los elementos traza de rocas alteradas presentaron una tendencia a disminuir su concentración con el incremento de la incompatibilidad de elementos de Cs a Lu, mostrando anomalías negativas en Nb y positivas en Th, U, Pb y Zr en los elementos de alto potencial iónico, mientras que en elementos litófilos de radio iónico grande las anomalías positivas fueron de Cs y las anomalías negativas en Sr y Rb. Los elementos de tierras raras mostraron para las muestras con alteración argílica y silícica un patrón mayormente empobrecido, mientras que las rocas que presentaron alteración argílica avanzada solo se muestran empobrecidas a partir del Pr y algunas muestras presentaron enriquecimiento en La, Ce, Nd y Sm.

El balance de masa mostró para las zonas productivas una movilidad elemental significativa en los elementos mayores, menores y traza con enriquecimiento en Mo, As, Nb, Pb, S, Th, Mo, Bi, U, SiO_2 , Ti_2O , y Sr, y empobrecimiento en Al_2O_3 , Fe_2O_{3T} , MgO , CaO , K_2O , Cr y Zn. La correlación bivariable sugiere que los elementos que presentaron mayor proporción de enriquecimiento con respecto al SiO_2 son el Th, Rb, Bi, y Sr, por lo contrario los elementos mayormente empobrecidos con respecto al Al_2O_3 son el Cr, Cu, Zn, CaO y Fe_2O_{3T} .

Palabras clave: balance de masas, inclusiones fluidas, temperaturas estabilizadas, asociación paragenéticas, alteración hidrotermal, correlación bivariable.

ABSTRACT

Studies of geochemical mass balance, fluid inclusions, petrographic, hydrothermally altered qualitative analysis and bivariate geochemical analysis were carried out on suite of rocks allowed to evaluate the processes of water-rock interaction within the geothermal field of Los Humeros (GFH). The microthermometry data of fluid inclusions of the wells H-41, H-42 and H-43 allowed to determine an area with the highest salinity in GFH (until 12.86 wt. % eq. NaCl). They presented a peculiar behavior fluid inclusions at critical temperatures from 1815 m of deep (H-43). Using isotherms of the homogenization temperatures of the fluid inclusions and stabilized temperatures it was determined that the GFH showed a slight cooling. The subsurface hydrothermal zones, with mineral alteration, were divided into: zone I argillic (<400), zone II propylitic, zone III with high acidity paragenetic associations and zone IV type skarn alteration hydrothermal (>1800 m).

The surface hydrothermal alteration of the GFH varied from argillic to advanced argillic, acid-sulfate argillic advanced and silicic alteration. The mobility of major elements in rocks with hydrothermal alteration showed enrichment for TiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO , Na_2O and K_2O with respect to SiO_2 , and depletion for $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$. In that same rocks the mobility of trace elements showed a decrease in its concentration in ratio to the increase of the incompatibility of elements from Cs to Lu, showing negative anomalies in Nb and positive in Th, U, Pb and Zr in the high field strength elements; while in large-ion lithophile elements were positive anomalies of Cs and negative anomalies in Sr and Rb. While the rare earth elements showed a depletion pattern while the advanced argillic alteration showed depletion from Pr and in some samples were observed enrichment in La, Ce, Nd and Sm.

About the result of the mass balance is evident an elemental mobility significantly in major, minor and trace elements with enrichment in Mo, As, Nb, Pb, S, Th, Mo, Bi, U, SiO_2 , Ti_2O , and Sr; also, a depletion in Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MgO , CaO , K_2O , Cr and Zn. The bivariate geochemical studies indicated that the elements with the highest proportion of enrichment with respect to SiO_2 are Th, Rb, Bi, and Sr, whereas the elements most impoverished with respect to Al_2O_3 are Cr, Cu, Zn, CaO and $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$.

Keywords: mass balance, fluid inclusions, paragenetic associations, hydrothermal alteration, bivariate geochemical studies.

I.- GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA

“...en poco más de 150 años hemos quemado casi la mitad del petróleo que se ha formado en millones de años y hemos transferido de la corteza terrestre a la atmósfera enormes cantidades de carbono que están contribuyendo a modificar el clima.”

Luca Ferrari, 2013.

I.1 Panorama Geotérmico en la Actualidad

Los sistemas geotérmicos representan en la actualidad un recurso importante para la generación de electricidad a nivel mundial, basta con las 612 plantas geotérmicas operando en el mundo (REN21's, 2016), las cuales suman una capacidad instalada de 12.63 GW y aunque representan menos del 0.4% (Figura 1) de la energía eléctrica total generada en el mundo, la obtención de electricidad por medio de los sistemas geotérmicos ha crecido 16 % desde el 2010, en donde la producción era de 8.9 GW (Bertani, 2015).

Es de mencionar que la energía geotérmica es considerada como una fuente inagotable de recursos energéticos en “términos humanos”, siendo solo comparable con la energía del sol, debido a lo anterior se le considera como un recurso renovable. En términos prácticos es definida como la utilización de la energía térmica que al ser transportada a través de las rocas por medio de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia niveles superiores de la misma (Armstead, 1983; Armstead, 1989; Dickson & Fanelli, 2005).

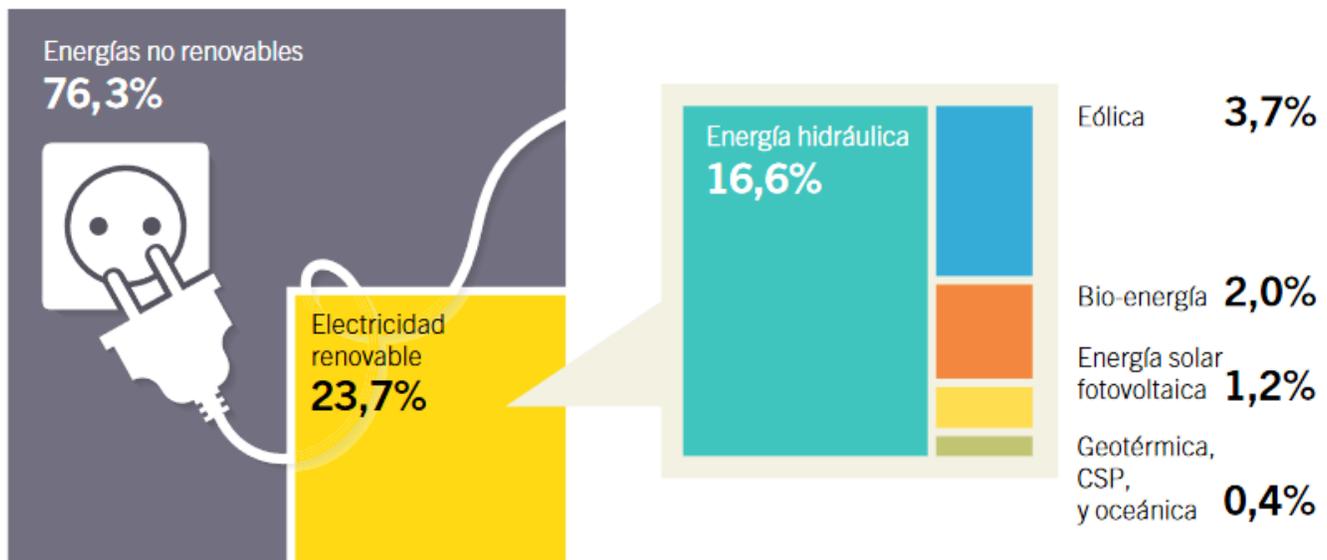


Figura 1. Cantidades estimadas de la producción global de electricidad para finales del 2015. Modificado de REN21's Renewables 2016 Global Status Report.

El calor generado continuamente en el interior de la tierra ya sea por el origen estelar de nuestro planeta (evolución de la tierra desde sus orígenes hace 4,470 Ma), cámaras magmáticas superficiales o por el decaimiento natural de isotopos radiactivos (Santoyo, E. & Torres, I., 2010; González-Ruiz *et. al.*, 2015) por ejemplo: en el caso del Th^{232} y el U^{238} , que en conjunto tiene una tasa energética de 860 EJ/año, lo que representa 2 veces la energía primaria consumida en el 2004 (463 EJ/año; MIT, 2006). Normalmente el gradiente geotérmico normal tiene un promedio de $33^\circ\text{C}/\text{Km}$, sin embargo en un sistema geotérmico se puede alcanzar temperaturas de $150^\circ\text{C}/\text{Km}$. Iglesias *et al.*, (2005) clasifico los sistemas geotérmicos de la siguiente manera:

- Sistemas Hidrotermales
- Sistemas Magmáticos
- Sistemas Geopresurizados
- Sistemas de Roca Seca Caliente
- Sistemas Marinos

Este estudio se enfocara a los sistemas hidrotermales, debido a que en actualidad estos sistemas son los únicos que se explotan comercialmente para la generación de energía eléctrica los cuales están constituidos principalmente por: una fuente de calor (cámara magmática), agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido. El agua de los sistemas hidrotermales es principalmente meteórica, la cual se infiltra lentamente al subsuelo, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde es calentada ya sea por conducción o por convección o por ambos, alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta $>400^\circ\text{C}$ (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010). Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principal-mente en: vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía.

- (i) *Vapor Dominante*. Estos sistemas producen vapor seco saturado y ligeramente sobrecalentado a presiones por encima de la atmosférica, el agua y vapor coexisten pero la fase de vapor domina en el sistema. En México el campo geotérmico de Los Humeros presenta características de un sistema de vapor dominante.
- (ii) *Líquido dominante (alta entalpía)*. Son sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas mayores a 180°C y son más abundantes que los anteriores. Ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).

- (iii) *Líquido Dominante (baja entalpía)*. Son sistemas con salmueras calientes, con temperaturas menores a 180°C, son más abundantes en comparación a los anteriores en una proporción de 10 a 1. Encontrándose en casi todos los países del mundo.

I.II Producción Mundial

El primer intento de producir electricidad por medio de la energía geotérmica inicio en Italia entre 1904-1905 en la zona de Larderello, pero no fue hasta en 1911 cuando se construye la primer planta de energía eléctrica (250 KW) en el Valle del Diablo, ya en 1950 se alcanzó los 300 KW en Italia hecho que demostró el importante valor industrial de la energía geotérmica y marcó el comienzo de la explotación de este recurso en el mundo y a partir de 1958 países como Nueva Zelandia (yacimiento de Wairakei), México (yacimiento de Pathé) y Estados Unidos (yacimiento de The Geysers) comienzan la producción termo-eléctrica (Pérez y Callejas, 2011).

En la actualidad una gran cantidad de países utilizan la geotermia de manera directa para diversas aplicaciones como (calefacción, balneario, agricultura, bombas de calor, etc.); sin embargo la generación de electricidad es la principal utilidad de la geotermia (Figura 2).

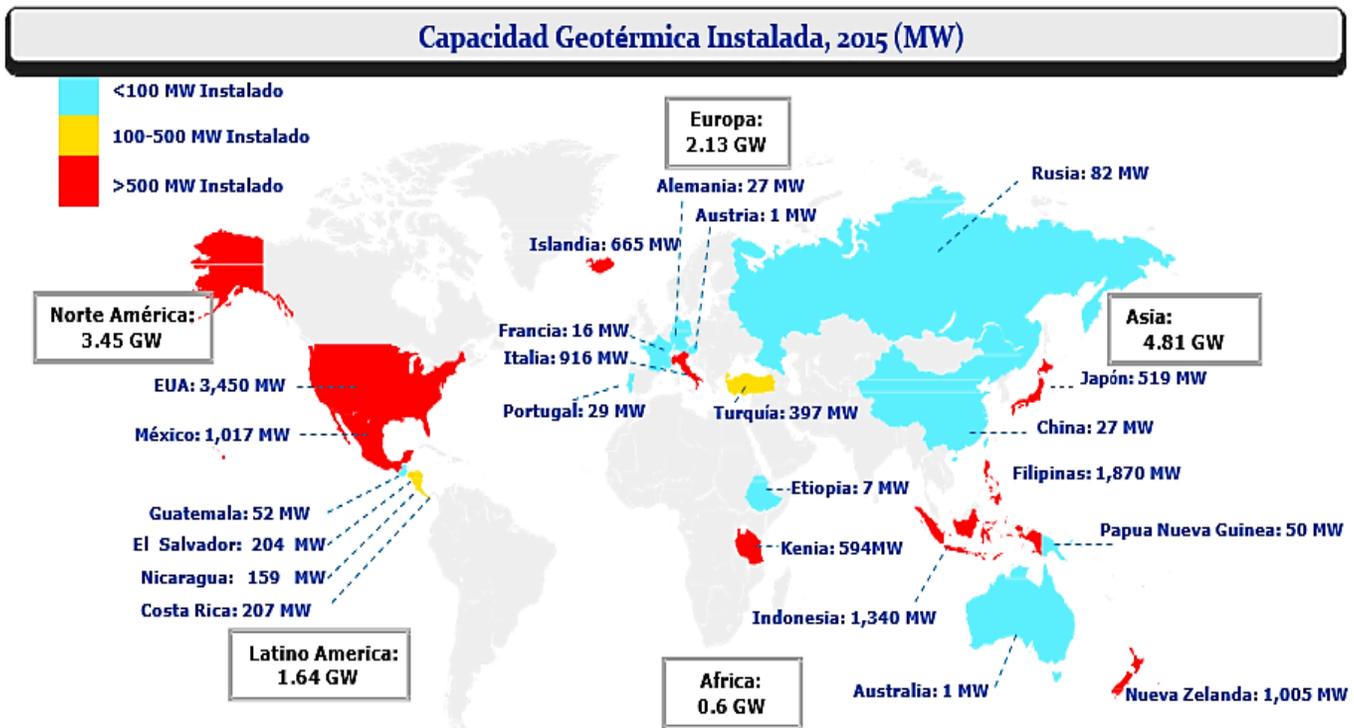


Figura 2. Capacidad geotérmica instalada para diciembre del 2015 (12.63 GW) en los principales países del mundo. Modificado de Bertani, 2015.

II-. ESTADO ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

II.I México a Nivel Mundial

Desde hace 58 años México figura como pionero y líder en el continente Americano en la explotación de recursos geotérmicos para la generación de electricidad. De los 78 países que disponen de información acerca del uso de la energía geotérmica (Santoyo, E. y Torres, I., 2010) solo 24 la utilizan para generar electricidad y de esa lista México (1,017 MW) ocupa el cuarto lugar a nivel mundial (Figura 3), estando por delante de él países como Estados Unidos (3,450 MW), Filipinas (1,870 MW) e Indonesia (1,340 MW) (Bertani, 2015).

En México son cinco los principales campos geotérmicos que se encuentran en operación para la producción de electricidad, de los cuales cuatro son de carácter federal: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros, Las Tres Vírgenes, y uno de iniciativa privada: Domo de San Pedro.

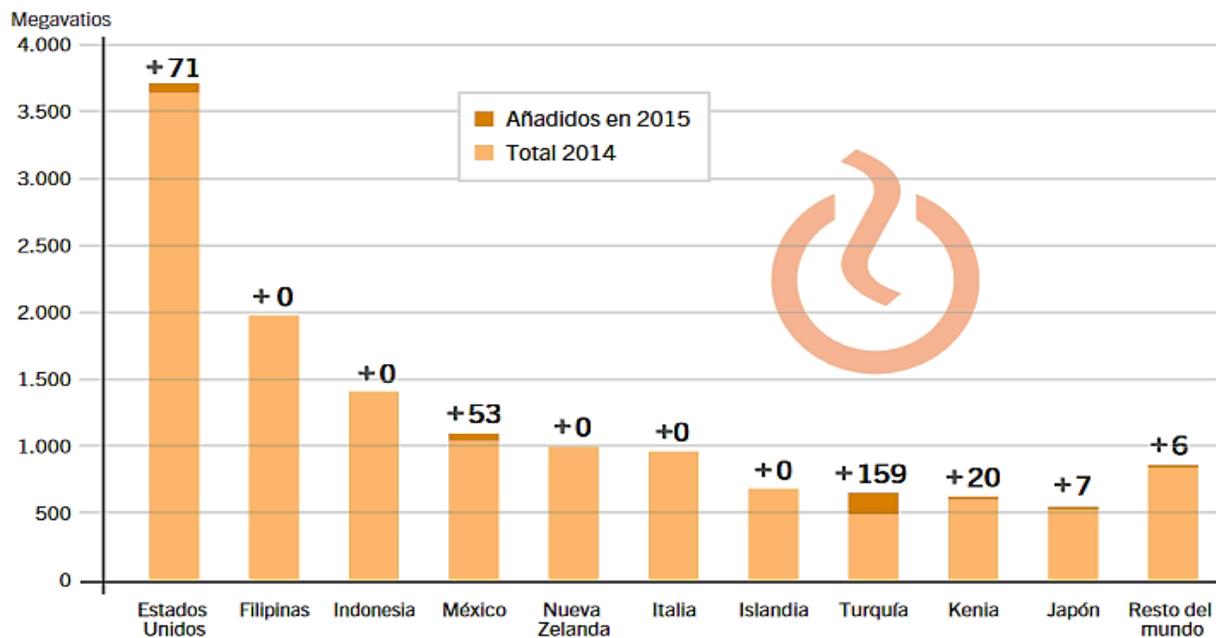


Figura 3. Capacidad geotérmica instalada y ampliada en México para diciembre del 2015. REN21's Renewables 2016 Global

Una de las nueve iniciativas de la Reforma Energética que fue decretada en diciembre del 2013, fue la nueva ley de energía geotérmica compuesta por 67 artículos y 13 transitorios, la cual pretende derribar las barreras, retos científicos y tecnológicos que enfrenta el país para el aprovechamiento sustentable de la energía, y mediante el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), la Secretaría de Energía (SENER), y a través del Fondo Sectorial CONACyT-SENER-Sustentabilidad Energética se crea el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) institución que busca estar a la vanguardia

a nivel mundial, y en conjunto con otras instituciones como CeMIESol, CeMIEBio, CeMIE-Eólico pretenden cumplir el acuerdo de la Ley General para el Cambio Climático, cuyo objetivo fijado es el generar 35 % de las necesidades energéticas del país a partir de las fuentes renovables para el 2024 (Santoyo *et al.*, 2015).

CeMIEGeo inició sus actividades en marzo del 2014, con 30 proyectos con 6 líneas de investigación, del cual se desprende el proyecto # 8, que tiene como misión el desarrollo, implementación y aplicación de metodologías analíticas de procesos de interacción agua-roca en reservorios geotérmicos de baja y alta entalpía para la aplicación en campos Mexicanos, proyecto a cargo del Dr. Eduardo González Partida investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Juriquilla. La presente tesis surge del desarrollo del proyecto mencionado anteriormente.

II.II México y la Geotermia

En 1959 se inauguró en México el primer campo geotérmico, el Pathé en el estado de Hidalgo, siendo esta la primer planta de energía geotérmica en el continente Americano la cual inició con una capacidad instalada de 3.5 MW, misma que estuvo funcionando hasta 1973 cuando fue desmantelada debido a que el vapor era insuficiente. En este mismo año Cerro Prieto comenzó la producción geotérmica industrial con la operación de dos primeras unidades con capacidad de 37.5 MW cada una, estas unidades, en conjunto con otras dos con la misma capacidad, se encuentran actualmente fuera de operación, después de haber concluido su periodo de vida útil (CeMIEGeo, 2016).

Los campos geotérmicos en México se han clasificado desde el punto de vista de su contenido energético en tres tipos: 1°- Sistemas de baja entalpía con temperaturas de 50° a 140 °C; 2°- Sistemas de moderada entalpía que tienen temperaturas de 140° a 200 °C; y 3°- Sistemas de alta entalpía 200° a 350 °C (González-Ruiz *et. al.*, 2015). En la actualidad México por medio de CFE ha venido operando los cuatro principales campos geotérmicos de tipo hidrotermal de alta entalpía, con una capacidad instalada de 1,017 MW (Bertani, 2015), lo que satisface a dos millones de hogares en promedio, sin embargo la generación de electricidad por este medio representa a nivel nacional el 3.6 % del total de energía neta generada (Figura 4).

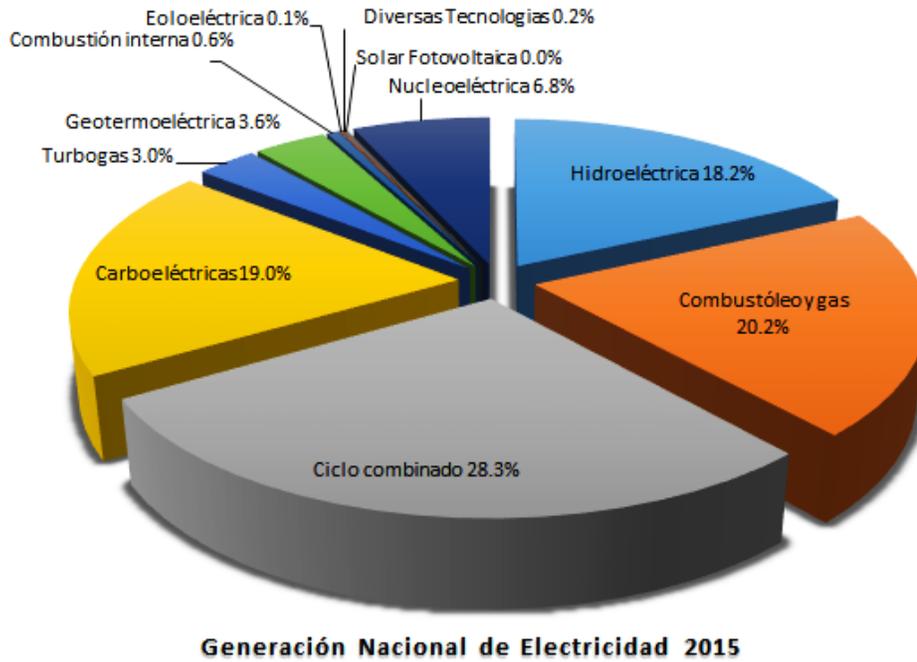


Figura 4. Generación de electricidad neta de las diferentes fuentes para el año 2015 en México, donde el 77.3% siguen siendo fuentes no renovables y solo el 22.7% son fuentes renovables. Informe anual de la CFE (2015).

El más grande campo geotérmico del país es Cerro Prieto en Baja California Norte (Figura 5-a), con una generación anual de 4,100 GWh, se localiza a unos 13 msnm en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, dentro de una cuenca tectónica transtensional formada entre las fallas laterales Imperial y Cerro Prieto-Cucupah que pertenecen al sistema de San Andrés. Cerro Prieto es un campo instalado en un ambiente sedimentario, con un yacimiento geotérmico hidrotermal de líquido dominante, cuyos fluidos están contenidos en areniscas intercaladas con lutitas del Terciario Medio-Superior, que descansan sobre un basamento predominantemente granítico cretácico (CeMIEGeo, 2016).

El campo de Los Azufres en Michoacán (Figura 5-b) genera anualmente 1,550 GWh, una de las ventajas de este campo es que el sistema central no consume agua de enfriamiento ni emite gases de combustión. Está ubicado en la porción central de México, dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), a una altitud media de 2,850 msnm. Los Azufres es un campo volcánico cuyos fluidos están alojados en rocas principalmente andesíticas de edad Mioceno-Plioceno las cuales están cubiertas por riolitas de edad cuaternaria. Este es un yacimiento de líquido dominante, cuya fuente de calor parece ser la cámara magmática que alimenta al del Volcán San Andrés (CeMIEGeo, 2016).

Un tercer campo es Los Humeros en Puebla (Figura 5-c), con una generación anual de 340 GWh siendo el campo geotérmico con la temperatura más alta del país (hasta 400°C), se encuentra también dentro del CVTM en la porción oriental, a una elevación promedio similar a la de Los Azufres. La CFE ha desarrollado

este campo dentro de una caldera volcánica de unos cien mil años de antigüedad, llamada Caldera de Los Potreros, anidada en otra caldera mayor y ligeramente más antigua conocida como Caldera de Los Humeros. Los Humeros es un campo volcánico de vapor dominante cuya fuente de calor es la cámara magmática alimentadora de ambas calderas, cuyos fluidos están contenidos en una secuencia de andesitas y tobas de edad Mio-Pliocénica que descansan sobre un basamento calcáreo con intrusiones, existen zonas metamorfizadas las cuales son cubiertas por ignimbritas (CeMIEGeo, 2016).

El último campo geotérmico el de Las Tres Vírgenes en Baja California Sur (Figura 5-d) genera anualmente 55 GWh, está localizado a la mitad de la península de Baja California, dentro del complejo volcánico cuaternario del mismo nombre, a unos 750 metros de altitud sobre el nivel del mar. El campo contiene un yacimiento hidrotermal de líquido dominante en el que los fluidos están alojados en un basamento granítico cretácico, que forman parte del Batolito de California, cuya fuente de calor parece ser la cámara magmática que alimenta al volcán más reciente y más meridional de la línea de tres volcanes que le dan nombre al complejo (CeMIEGeo, 2016).

La CFE tiene en operación continua en esos campos más de 250 pozos geotérmicos con profundidades promedio de 2 mil 500 metros, estimándose un ahorro para México de más de 10 millones de barriles de petróleo al año (González-González, 2009).



Figura 5. Vistas panorámicas de los cuatro principales campos geotérmicos en México: a) Cerro Prieto en Baja California Norte, b) Los Azufres en Michoacán, c) Los Humeros en Puebla y d) Tres Vírgenes en Baja California Sur.

II.III México, Futuras Expectativas en Geotermia.

Desde 1982 la contribución científica para el desarrollo de las energías renovables en México se debe principalmente a instituciones privadas, públicas y gubernamentales; teniendo un principal interés en el desarrollo de la biomasa seguido por la solar y solo un 4.5 % de las publicaciones científicas (revistas indexadas, revistas institucionales, simposios, etc.) son enfocadas a la geotermia (Figura 6). De este 4.5% el Instituto de Investigaciones Eléctricas cuenta con un 40.1 % de la publicaciones científicas, la Universidad Nacional de México cuenta con el 12.38 % e Instituciones gubernamentales como la CFE cuentan con el 7.43 % (Tabla 1) el resto pertenece a diversas universidades de carácter público (Aleman Nava *et al.*, 2014).

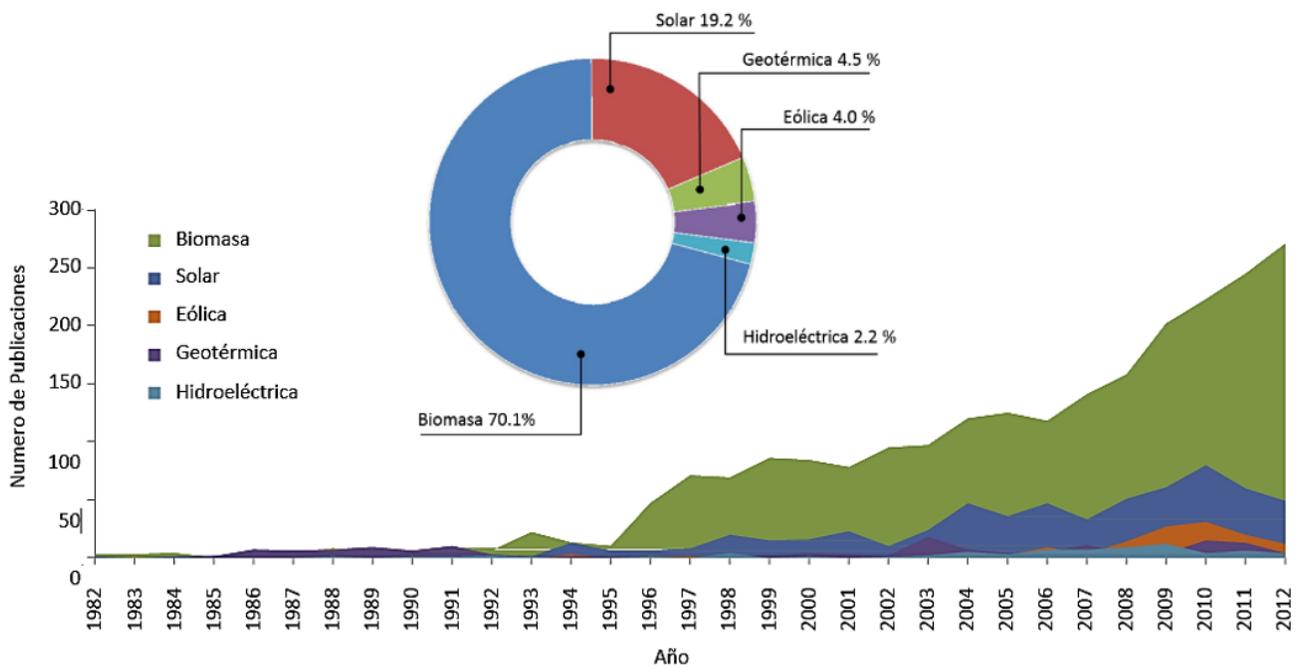


Figura 6. Publicaciones científicas desde 1982-2012 referente a energías renovables en México. Modificada de Alemán Nava *et al.*, 2014

Tabla 1. Principales Instituciones por número de publicaciones desde 1982-2012. Tomado de Alemán Nava *et al.*, 2014

Institución	Geotermia (%)	Tipo
Instituto de Investigaciones Electricas	40.1	Privado
Universidad Nacional Autónoma de México	12.38	Publico
Comisión Federal de Electricidad	7.43	Publico
Universidad Autónoma de Baja California	1.98	Publico
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico	1.98	
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares	1.98	Publico
Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa	1.98	Publico
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo	1.98	Publico
Universidad Autónoma del Estado de Morelos	1.49	
Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos	1.49	Gobierno

Podemos destacar que México, aunque ocupa el 4to lugar mundial en producción de energía eléctrica por medio de la geotermia, es el 9no lugar en la contribución en estudios o publicaciones científicas con tan solo el 3 %, estando en primer lugar países como USA con 26.7 %, Alemania con 7.2 % y China con el 7.1 % (Alemán Nava *et al.*, 2014).

Pese a las estadísticas anteriores, existe un alto potencial en México, lo cual se demuestra en los siguientes puntos descritos a continuación:

1º- La continua ampliación de la capacidad instalada en los campos geotérmicos de México (Figura 7), como es el caso de Los azufres con una ampliación de 53.4 MW, siendo en 2015 uno de los 6 únicos países que ampliaron su producción (REN21's, 2016).

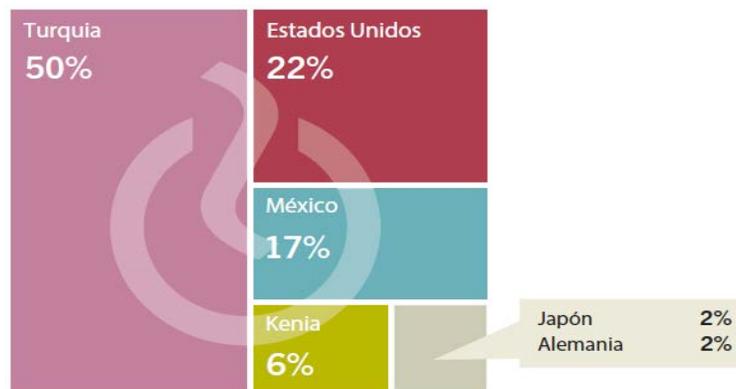
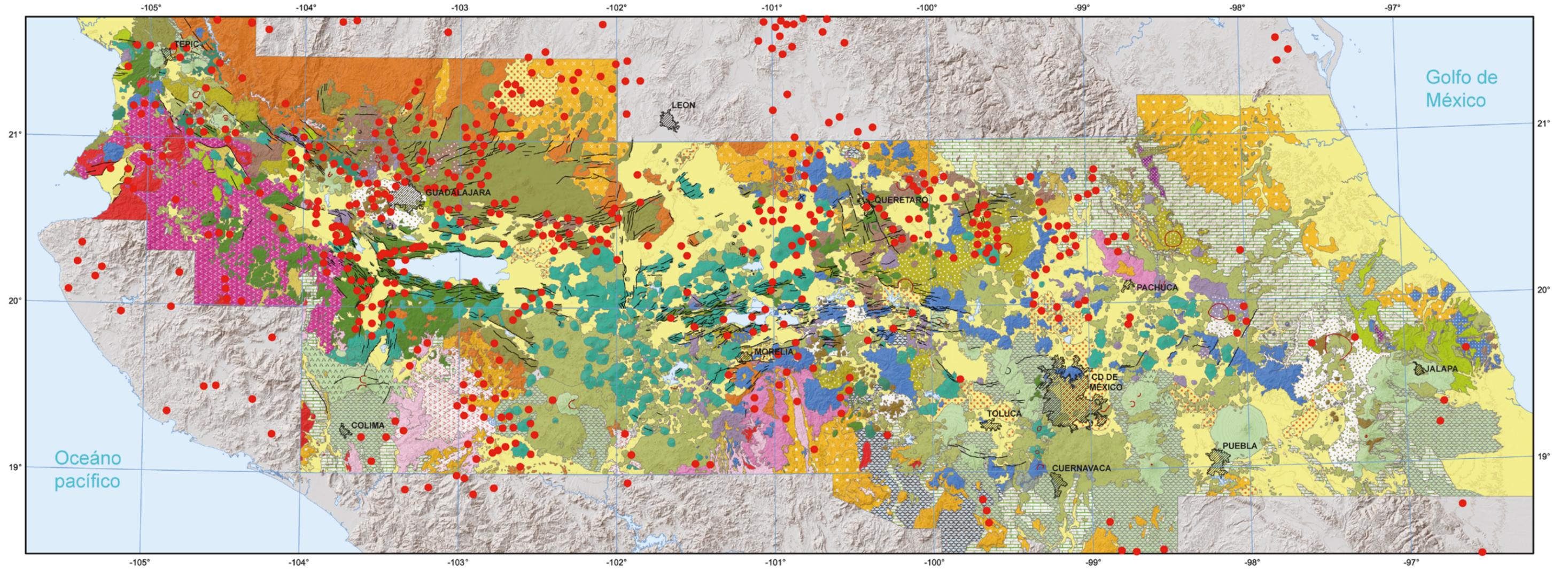


Figura 7. Energía geotérmica adicionada en el 2015 en el mundo. Tomado de REN21's, 2016

2º- El catálogo de anomalías térmicas que se creó en forma de censo (González-Ruiz *et al.*, 2015), con la finalidad de dar a conocer el potencial geotérmico del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Figura 8), donde el 77 % de las manifestaciones termales de baja entalpía. El 18 % son de entalpías medias. El 5 % de las manifestaciones restantes presentan características de sistemas de alta o muy alta entalpía.

3º- El último punto pero no menos importantes son las estimaciones del potencial geotérmico echas a lo largo del desarrollo científico en México. Para yacimientos geotérmicos individuales de alta entalpía se estima que podrían alcanzar en conjunto los 1,000 MW (Gutiérrez-Negrín, 2007). En el caso de los recursos de media y baja temperatura (< 180°C) disponibles a lo largo del país, evaluaciones preliminares realizadas en sólo 276 manifestaciones hidrotermales en donde las temperaturas promedio de estos sitios es de 111 °C, se ha estimado que las cantidades de energía recuperables estén entre 21.4-23.9 x 10⁹ MW (Iglesias y Torres, 2009). La última estimación a nivel nacional concluyó que el potencial geotermoeléctrico es de 9686 MW (Ordaz-Méndez *et al.*, 2011), sin embargo solo existen en la actualidad 20 zonas con el potencial económico que en conjunto estimado suma 762 MW (Hiriart *et al* 2011).

Mapa Geológico del Cinturon Volcánico Trans-Mexicano



LITOLOGÍA / EDAD

	DEPOSITOS SUPERFICIALES Cuaternario		LAVAS MÁFICAS Plioceno		IGNIMBRITAS SILICICAS Mioceno Temprano
	DEPOSITOS LACUSTRES Y VOLCANOSSEDIMENTARIOS Cuaternario-Mioceno Tardio		DOMOS SILICICAS, FLUJOS E IGNIMBRITAS Plioceno Temprano		LAVAS ANDESITICAS Y BASÁLTICAS Oligoceno-Mioceno Temprano
	IGNIMBRITAS SILICICAS Y DOMOS Holoceno-Pleistoceno medio		FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y DE CAÍDA Plioceno Temprano		IGNIMBRITAS SILICICAS Y DOMOS Oligoceno
	FLUJOS PIROCLÁSTICOS SILICICOS Y DE CAÍDA Holoceno-Pleistoceno Medio		FLUJOS DE LAVAS BASÁLTICOS, ANDESITICOS Y CONOS Mioceno Tardio-Plioceno		CONGLOMERADO, ARENISCAS Y LIMONITAS Paleoceno-Oligoceno
	ESTRATOVOLCANES ANDESITICOS A DACITICOS Cuaternario-Mioceno Tardio		DOMOS SILICOS Y PIROCLASTOS Mioceno Tardio		ROCAS INTRUSIVAS GRANITICAS A DIORITICAS Paleoceno-Mioceno
	AVALANCHAS DE ESCOMBROS, LAHARES Y EPICLASTICOS Cuaternario		FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y DEPÓSITOS DE CAÍDA Mioceno Tardio		DEPÓSITOS VOLCANOSSEDIMENTARIOS CONTINENTALES E IGNIMBRITAS SILICAS Cretácico
	DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS Cuaternario		DEPÓSITOS LACUSTRES Y CLASTOS Mioceno Medio-Tardio		SUCESIONES SEDIMENTARIAS MARINAS Cretácico
	LAVAS MÁFICAS Cuaternario		FLUJOS DE LAVA BASÁLTICA Y VOLCÁNES ESCUDOS Mioceno Tardio		ROCAS INTRUSIVAS GRANITICAS A DIORITICAS Cretácico
	CONOS MONOGENÉTICOS Y FLUJOS DE LAVAS ASOCIADOS Plioceno Tardio-Cuaternario		FLUJOS DE LAVA BASÁLTICA Y CONOS CIDERÍTICOS Mioceno Tardio-Plioceno Temprano		ROCAS VOLCANOSSEDIMENTARIAS Y VOLCANICAS MARINAS Cretácico Temprano
	CONGLOMERADOS Y SANDSTONE Plioceno-Cuaternario		LAHARES, DEPÓSITOS DE FLUJOS DE ESCOMBROS Y TOBAS Mioceno Medio		SUCESIONES METASEDIMENTARIAS O VOLCANOSSEDIMENTARIAS Jurásico-Cretácico Temprano
	CONOS DE LAVAS Y ESCUDOS BASÁLTICOS Y ANDESITICOS Mioceno Tardio-Plioceno		LAVAS BASÁLTICAS A DACITICAS Mioceno		ROCA PALEOZÓICO
	DOMOS SILICICAS, FLUJOS E IGNIMBRITAS Plioceno Tardio-Pleistoceno Temprano		ROCAS GABROICAS A GRANODIORITICAS Mioceno		
	IGNIMBRITAS SILICICAS Plioceno Tardio-Pleistoceno Temprano		FLUJOS DE LAVAS BASÁLTICAS Y VOLCÁNES ESCUDOS Mioceno		

ELEMENTOS GEOLÓGICOS

	FALLAS
	CALDERAS VOLCÁNICAS O CRATERES
	MANIFESTACIONES GEOTERMICAS

OTROS ELEMENTOS

	CURVAS DE ELEVACIÓN
	CUERPOS DE AGUA
	ÁREA URBANA

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Projection:	Lambert Conformal Conic
Datum:	North American 1927 (NAD27)
Central Meridian:	-102°00'
Standard Parallel 1:	17°30'
Standard Parallel 2:	29°30'
Latitude of Origin:	12°00'
False Easting:	2,500,000 m
False Northing:	0 m

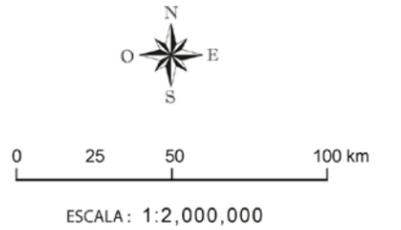


Figura 8. Mapa de Anomalías Geotérmicas del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Modificado de Ferrari *et al.*, 2012 y Gómez-Tunea *et al.*, 2007a y 2007b

III. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

III.I Justificación

La mayoría de los estudios relacionados a la interacción agua-roca en el campo geotérmico Los Humeros (CGH) se han enfocado principalmente al subsuelo, originado por la existencia de pozos de exploración-explotación, debido a lo anterior el presente trabajo se enfoca en los procesos superficiales de interacción agua-roca de este campo geotérmico. El análisis de la concentración de elementos mayores, menores y traza de las principales unidades litológicas superficiales que han sido afectadas por hidrotermalismo serán usados para determinar la movilidad elemental mediante diagramas bivariantes y un balance de masas permitiendo conocer si las rocas sufrieron enriquecimiento o empobrecimiento elemental originado principalmente por la circulación de los fluidos hidrotermales. Complementando del análisis mencionado anteriormente se anexan nuevos estudios petrográficos y minerográficos de diversos pozos de exploración-explotación, los cuales darán información más detallada de la mineralogía de alteración. Así mismo el estudio de inclusiones fluidas de diversos pozos nos dará información sobre la evolución de las temperaturas de los fluidos en el subsuelo en campo geotérmico Los Humeros.

Con base en esta justificación, este estudio contribuirá a ampliar el conocimiento sobre los procesos de interacción agua-roca del campo geotérmico de Los Humeros.

III.II Objetivos

III.II.I Objetivos Generales

Determinar la movilidad elemental que producen los procesos de interacción agua-roca en las rocas superficiales del reservorio geotérmico, con la finalidad de obtener información sobre el tipo de alteración, paragénesis mineral de alteración, los elementos enriquecidos o empobrecidos en las rocas superficiales alteradas y finalmente la evolución de las temperaturas de los fluidos del subsuelo.

III.II.II Objetivos Específicos

- 1) Determinar la concentración de elementos mayores, menores y traza de las unidades litológicas que afloran en superficie del CGH, con la finalidad de conocer la movilidad elemental que han sufrido las rocas en debido a la interacción agua-roca
- 2) Obtener nuevos datos petrográficos y minerográficos de diversos pozos de exploración- explotación, que complementen la información existente sobre la composición mineralógica de alteración y el zoneamiento mineralógico del CGH.

- 3) Obtener datos microtermométricos de las inclusiones fluidas de los pozos de exploración-explotación 41, 42 y 43, que en conjunto con los datos pre-existentes del CGH permitan realizar un análisis comparativo con las temperaturas estabilizadas medidas en los pozos a fin de establecer el comportamiento térmico evolutivo de fluidos.

IV. GEOLOGÍA LOCAL, REGIONAL Y ELEMENTOS TECTÓNICOS RELACIONADOS AL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS

IV.I Esbozo del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano

El campo geotérmico de Los Humeros está localizado en el arco volcánico construido sobre la margen meridional de la placa norteamericana (Ferrari, 2000), denominada Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) la cual atraviesa al país de oeste a este, lugar donde se alojan el 79 % de las anomalías termales conocidas en México (González-Ruiz *et al.*, 2015), y es probable que sea la región de México en la que se han concentrado la mayoría de las investigación geológicas, geofísicas y geoquímicas. Debido a estas investigaciones y a la abundancia de fechamientos isotópicos parecer ser clara la individualización del CVTM como una entidad geológica que ocurrió a finales del Mioceno temprano, como resultado de una rotación antihoraria del arco que formo la Sierra Madre Occidental (Ferrari *et al.*, 1999). El CVTM está constituido por más de 8000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos que se extiende desde las costas del Pacífico en San Blas hasta Veracruz (Demant, 1978), tiene 1000 km de longitud y un ancho variable de 80-230 km aproximadamente y posee una distribución preferencial E-W en la parte central y oriental, mientras que en la parte occidental tiene una orientación W-NW. El arco volcánico presenta varias peculiaridades: 1) su parte central y oriental no son paralelas a la trinchera Mesoamericana por lo que se encuentra formando un ángulo de 16° con respecto a la trinchera, 2) sus principales estratovolcanes como los volcanes Cántaro – Nevado de Colima – Iztaccíhuatl – Popocatepetl o Pico de Orizaba-Cofre de Perote, están alineados transversalmente N-S con respecto al arco, 3) presenta una gran variabilidad geoquímica por tener productos de un ambiente de subducción e intraplaca, 4) las placas de subducción son relativamente jóvenes, 10 Ma para la placa Rivera y entre 11 y 23 Ma para la placa de Cocos, 5) ausencia de sismicidad por debajo de la zona volcánica (Ferrari *et al.*, 2012). El CVTM empieza su actividad a finales del Mioceno temprano (~19 Ma) llegando a la época actual y contiene la mayor parte del volcanismo histórico y actual de México; vulcanismo que consiste en estratovolcanes andesíticos, campos de conos de ceniza, las apariciones aisladas de vulcanismo riolítico. La composición del CVTM es principalmente subalcalino con una cantidad menor de productos alcalinos y si se toma en cuenta la distribución espacial del vulcanismo y su composición, la historia geológica del CVTM se puede

dividir en cuatro episodios (Gómez-Tuena *et al.*, 2007b): 1) la instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno temprano a tardío (~19-8 Ma), 2) un episodio máfico del Mioceno tardío que va migrando de W-E y se ubica al norte del arco anterior (~11-3 Ma), 3) un episodio silícico a finales del

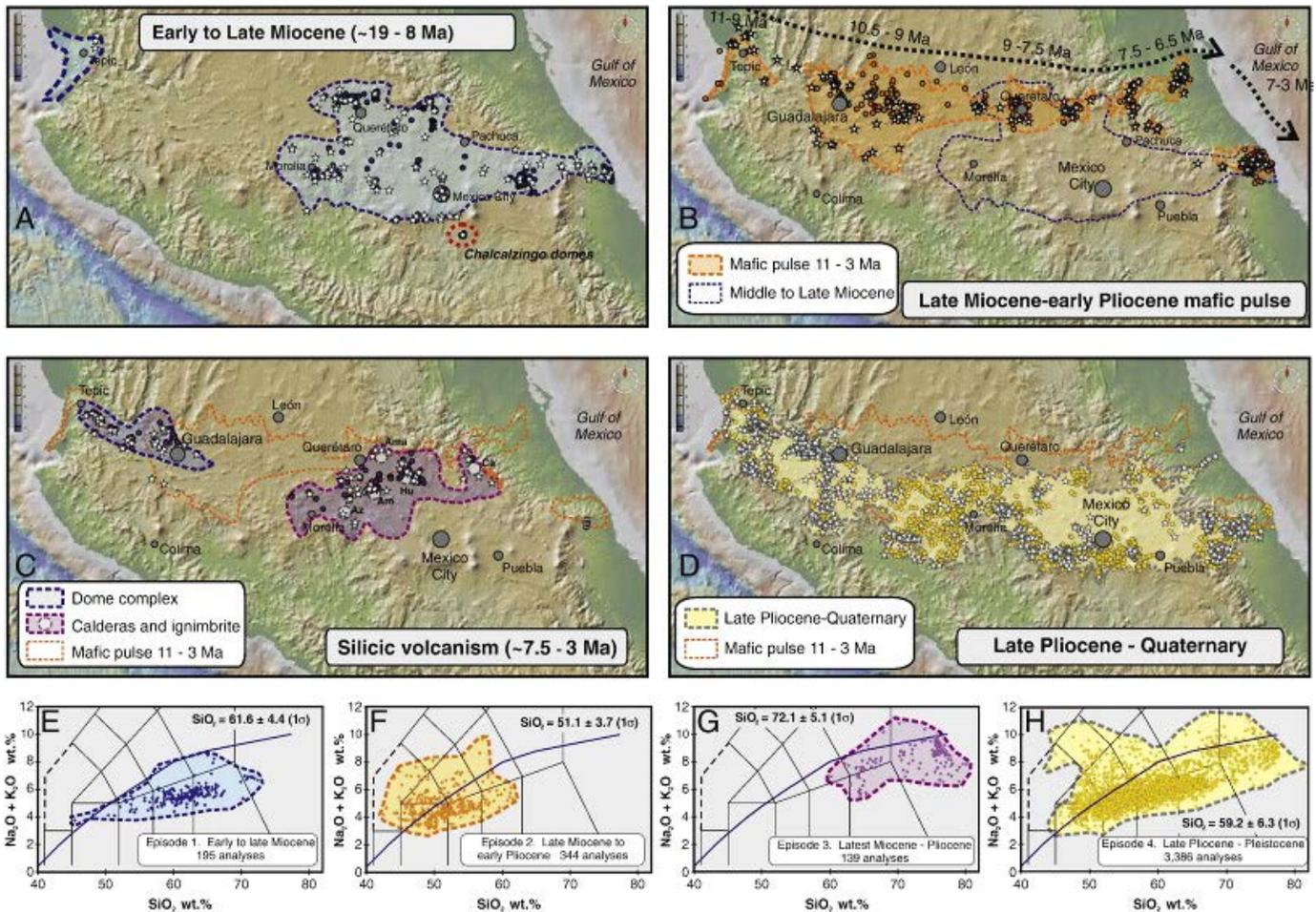


Figura 9. Distribución del vulcanismo de la CVTM y composición de los productos de los cuatro episodios que se ha reconocido en su evolución A y E) instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno temprano a tardío, B y F) episodio máfico del Mioceno tardío que va migrando de W-E, C y G) episodio silícico a finales del Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno temprano, D y H) re-instauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío. Tomado de Ferrari *et al.*, 2012

Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno temprano y marca el regreso del vulcanismo hacia el sur (~7.5 - 3), 4) la re-instauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío (figura 9).

Para fines de este estudio hablaremos más del cuarto episodio donde se dio lugar la re-instauración de un arco con gran variedad composicional a partir del Plioceno tardío (Plt), llamado también como el CVTM moderno, (si se quiere indagar en los anteriores episodios volcánicos se tendrá que leer Gómez-Tuena *et al.*, (2007b) y Ferrari *et al.*, (2012)). A partir de esta época (Plt) el vulcanismo silícico y bimodal se ve reemplazado por productos volcánicos que cubren todo el rango composicional basáltica a riolítica (Figura 9, D y H). En el segmento occidental de este arco volcánico se emplazan lavas con características

de intraplaca, mientras que la parte trasera del arco se construyen estratovolcanes como Tequila, Ceboruco, Las Navajas, etc., ~100 km detrás del frente volcánico, donde el complejo volcánico de Colima representa el mayor volumen de material volcánico emplazado en el CVTM, esto es debido a que se ubica por encima de la zona de desgarre entre la placa Rivera y la placa de Cocos. Hacia la porción central del CTVM se formó el campo volcánico Michoacán – Guanajuato con más de 1000 cono monogenéticos y 400 centros poligenéticos formados a partir de ~2.8 Ma, el cual continua activo hasta la actualidad como lo demuestran las erupciones del Jorullo y Parícutin (Hasenaka y Carmichael, 1985), más hacia el este se encuentran las calderas de Los Azufres, Zitácuaro y domos dacíticos emplazados a los alrededores de estas caldera. Ya en la fracción oriental del CVTM, composiciones máficas se concentran en los campo volcánicos de Sierra Chichinautzin, Apan – Tezontepec (Gómez-Tuena *et al.*, 2007b). Los productos más evolucionados en el tiempo se encuentran en la caldera de Tulancingo – Acozulco (Verma, 2001), Los Humeros (Ferriz y Mahood, 1984) zona de estudio del presente trabajo y los domos de la región Libres – Oriental, Puebla. Al oriente del Valle de México se desarrolla la cadena volcánica con orientación N-S constituida por el Cerro de Tláloc, el complejo Iztaccíhuatl y el volcán Popocatepetl, con edades que se vuelven progresivamente más jóvenes hacia el sur. Un poco más hacia el oriente se encuentra el volcán de La Malinche y el alineamiento N-S del Pico de Orizaba – Cobre de Perote, todos con edades menores de 1 Ma (Ferrari *et al.*, 2012).

IV.II Geología Regional y elementos tectónicos de la Caldera de Los Humeros.

El marco geológico regional del CGH (Figura 10) ha sido descrito principalmente por Viniegra (1965), Yañez y García (1982), Negendank *et al.* (1985) y Campos y Garduño (1987), donde las rocas más antiguas que han sido reportadas corresponden a granitos y esquistos de edad Paleozoica los cuales forman el Macizo Teziutlán (De la Cruz, 1983) posteriormente a partir del Jurásico Medio inicia el depósito de lutitas negras carbonosas con intercalaciones de caliza arcillosa perteneciente a la Fm. Santiago descrita por Reyes (1964), la cual se depositó en un ambiente somero en condiciones euxínicas sobreyaciendo concordantemente a la unidad anterior se encuentra la Fm Tamán descrita por Heim (1926), compuesta por caliza negra de grano fino y caliza microcristalina que alterna con lutita negra, cuyo ambiente de formación está relacionado con cuencas intraplaca de tipo euxínicas, cuyo carácter es meramente transgresivo y representa el avance de la línea de costa sobre los altos estructurales. La serie Jurásica descrita anteriormente aflora principalmente en el norte del área.

Ya en el Cretácico, como consecuencia de la transgresión marina, se vio favorecido el depósito de sedimentos calcáreos que es la unidad más antigua que aflora en el área es la Fm Tamaulipas Inferior

descrita por Stepheson (1922), representada por bancos potentes de calizas cristalinas con lentes de pedernal negro, cuyo ambiente de formación para la parte inferior corresponde a marino somero de alta energía debido a los remanente topográficos del Jurásico. En el Cretácico Medio y Superior se depositaron calizas arcillosas de estratificación delgada y media con bandas de pedernal negro pertenecientes a la Fm. Tamaulipas Superior (Stepheson, 1922) le sobreyacen acumulaciones de calizas arcillosas en capas delgadas con alguna intercalación de lutitas pertenecientes a la Fm. Agua Nueva (Stepheson, 1922), cuyo ambiente de formación fluctuaba entre plataforma externa y cuenca intraplaca, a esta unidad le sobreyace transicional y concordante-mente la Fm. San Felipe descrita por Jeffreys (1910), compuesta por calizas arcillosas con intercalaciones de bentonita, indicando un ambiente de formación de plataforma externa y cuenca intraplaca, la presencia de bentonita indica vulcanismo del arco magmático del occidente contemporáneo al depósito. La secuencia sedimentaria Cretácica descrita, aflora en todas direcciones alrededor de la caldera de Los Humeros, al SW esta secuencia cretácica forma prominencias topográficas como la Sierra de Tepeyahualco; cabe mencionar que algunos de los pozos perforados atraviesan las unidades Cretácicas (González-Partida, 2001).

A finales del Cretácico y durante el Paleógeno tuvo lugar la orogenia Laramide, consecuencia de esfuerzos compresivos en dirección NE-SW, afectando la secuencia sedimentaria Jurásica – Cretácica generando pliegues principalmente al norte de la cuenca y cabalgaduras sobre calizas hacia el sur, los esfuerzos orogénicos produjeron bajo metamorfismo regional en el medio sedimentario. Al término del proceso orogénico comenzó una fase de distensión representado por el Graben de Libres – Oriental del Oligoceno y de tendencia NW-SW, caracterizado por fallas normales y fracturas (Garduño *et al.*, 1985). Intrusiones Oligocénicas – Miocénica de composición granodiorítica y sienítica afectaron localmente la secuencia sedimentaria para estas rocas dataron edades de 31 hasta 14.5 Ma (Yañez y García, 1982). Después de una etapa de quietud donde predomino la erosión, un sistema más reciente tuvo lugar durante Mio-Plioceno con dirección predominante N-S, siendo su principal elemento el lineamiento Tehuacán – Pico de Orizaba – Cofre de Perote.

El último proceso de deformación ocurrido en la caldera de Los Humeros está relacionado con el magmatismo que genero la actividad volcánica de esta zona. Las estructuras más importantes son fallas anulares (caldera Los Humeros y caldera Los Potreros), cuya formación fue debida a la extravasación de importante volumen de magma, produciendo un vacío parcial en la cámara magmática, causando el colapso de su techo formando estas fallas anulares las cuales posteriormente se rellenaron por magma líquido que posteriormente solidifico formando diques anulares.

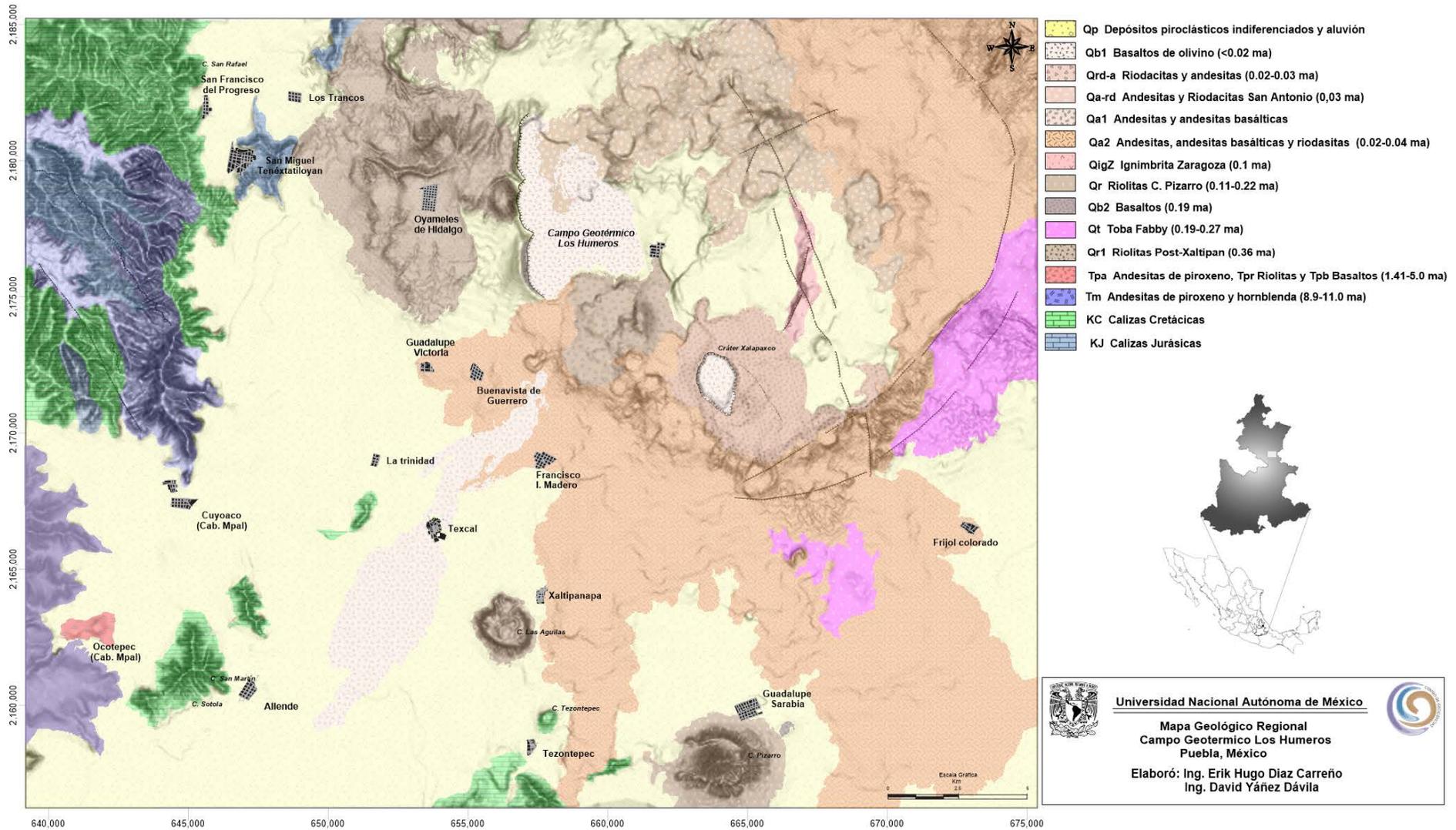


Figura 10. Geología regional del campo geotérmico Los Humeros, Puebla.

IV.III Evolución de la Caldera de Los Humeros

La última actividad volcánica pre-caldera registrada que constituye la base de los productos volcánicos de la caldera de Los Humeros, se caracteriza por una andesita afanítica de color gris claro y lavas ferrobásalticas nombrada andesita Teziutlán, con edades de 5, 3.5 y 1.5 Ma por lo que se sitúa principalmente en el Plioceno - Pleistoceno (Yáñez y García, 1982; Ferriz y Mahood, 1984).

La evolución de la actividad volcánica de la caldera de Los Humeros ha sido dividida en tres estadios (Harris-Dávila, 2014), el primero de ellos y más importante marca la actividad silíceo con la extrusión de lavas riolíticas y domos, seguida de una erupción explosiva de gran magnitud que origino las ignimbritas Xáltipan, esta erupción ocasiono la formación de la caldera de Los Humeros hace ~460 ka (miles de años). El segundo estadio (~360 ka) está marcado por tobas de caída aérea de composición riolita donde principalmente existen grandes acumulaciones de pumicita de caída la cual fue definida como toba Faby por Ferriz y Mahood (1984), este evento también fue acompañado por el emplazamiento de domos sobre la zona de fractura anular. Las extrusiones magmáticas continuaron con derrames de andesitas, andesitas basálticas y basaltos localizados en la parte central de la caldera, al sur tuvo lugar el tercer estadio (60 – 140 ka) representado por la Ignimbrita Zaragoza, que posteriormente provoco la formación de la caldera Los Potreros ubicada en el sector central de la caldera de Los Humeros. Después de esta extrusión mayor, se produjo la erupción postzaragoza la cual está distribuida hacia el este y sureste enmascarando los rasgos más antiguos de la zona, los productos volcánicos originados ppor esta erupción fueron principalmente de pómez de composición riódacítica y escoria de caída, que incluye el miembro Xoxoctic de pumicita de caída, el miembro Tilca rico en líticos, y finalmente el miembro Cuicuiltic el cual consta de intercalaciones de traquidacitas con basaltos-andesitas, pumicita y escoria. Finalmente el ultimo evento considerado post-calderico sucedió en la porción sur de la fractura anular de la caldera de Los Humeros, formando un arco de conos de escoria y derrames de lava de basalto de olivino, andesitas – basálticas, cuya extensión es de 15 km hacia el sur con edades menores a los 20 ka (Ferriz y Mahood, 1984, González-Partida, 2001).

Las unidades litológicas descritas anteriormente han sido cortadas por diversos pozos de exploración-explotación, descritas y clasificadas de acuerdo a diversos autores (Tabla 2) inicialmente se propuso dividirla en cuatro grandes grupos litoestratigráficos (Gutiérrez-Negrín, 1982; Viggiano y Robles, 1988a, b), posteriormente Cedillo *et al.* (1994) subdividió estos cuatro grandes grupos en nueve unidades litoestratigráficos y finalmente la última clasificación propuesta (Carrasco-Nuñez *et al.*, 2008; Pilar-Martínez, 2015) fue agruparlas en cuatro unidades que va desde la parte superior a la parte inferior:

unidad 1. Post-calderico (<100 ka), unidad 2. Volcanismo calderico (510 – 100 ka), unidad 3. Vulcanismo pre-caldera (10 – 1.9 Ma), unidad 4. Basamento (140-31 Ma).

Tabla 2. Unidades litológicas del subsuelo propuestas para el campo geotérmico Los Humeros. Tomado de Pilar-Martínez, 2015.

Viggiano y Robles (1988)	Litología	Cedillo et al (1994)	Litología	Carrasco-Núñez et al (2008)	Litología	Pilar-Martínez (2015)	Litología		
I	Andesitas de augita y basaltos	1	Pómez, basaltos y andesitas	Grupo Post-calderico	Lavas-escorias basálticas, andesítico-basálticas y pómez	Grupo Post-calderico	Lavas-escorias basálticas, andesítico-basálticas y pómez		
II	Ignimbritas vítreas y líticas	2	Tobas líticas	Grupo Calderico	Superior	Grupo Calderico	I. Zaragoza	Tobas líticas dacíticas-riodacíticas, andesitas	
		3	Ignimbritas líticas y vítreas		Principal		Tobas riolíticas vítreas-líticas	T. Faby	Tobas cristalinas-líticas dacíticas-andesíticas
		4	Intercalaciones de andesitas e ignimbritas		Basal		Andesitas y tobas riolíticas	I. Xáltipan	Andesitas, a-basálticas, tobas riolíticas cristalinas-líticas
III	Andesitas de augita en la parte superior, andesitas de hornblenda en la parte inferior. Localmente tobas y basaltos	5	Andesitas de augita	Grupo Pre-calderico	Superior	Grupo Pre-calderico	Superior	Andesitas y dacitas porfídicas-microporfídicas	
		6	Toba vitrea Humeros		Tobas alteradas		Toba vitrea andesítica		
		7	Andesitas de hornblenda		Inter-medio		Andesitas de piroxeno y basaltos	Inferior	Basaltos, andesitas y dacitas porfídicas-microporfídicas
		8	Basaltos		Basal		Andesitas de hornblenda y basaltos		
IV	Hornfels de calcita, diópsida, wollastonita y granate; localmente calizas y granodioritas	9	Calizas, calizas metamorfozadas e intrusivos	Basamento pre-volcánico	Calizas metamorfozadas, hornfels y skarns, rocas intrusivas (diabasas, granodioritas)	Basamento pre-volcánico	Calizas metamorfozadas, hornfels y skarns, rocas intrusivas (diabasas, granodioritas)		

Una división de unidades litológicas realizada en los pozos H-15, H-16, H-17, H-19 y H-12 (Martínez-Serrano y Alibert-Chantal, 1994) es la que enfatiza los minerales de alteración de cada unidad (Figura 11), determinando que las unidades litológicas de la zona de Colapso Central y Xalapazco son las misma y que solo existen diferencias en el espesor, logrando agruparlas en 7 unidades litológicas con las siguientes características principales: (1ª) Calizas con diversas texturas y fauna de edad Cretácico Superior descrita por Viniegra, (1965) esta es la unidad litológica más profunda y está siendo afectada por metamorfismo de contactos e hidrotermalismo de alta temperatura, debido a que se encuentra transformada parcialmente a skarn de wollastonita, granate, clinopiroxeno y calcita recristalizada. (2ª) Andesitas y dacitas microlíticas, traquíticas y porfíricas éstas cubren discordantemente a la unidad anterior, tiene espesores que van de 100 a 500 m, este conjunto de rocas se puede asociarse con la Formación Tezuitlan descrita por Yañez, (1980), los minerales de alteración observados en esta litología son epidota, anfíbol, cuarzo, piroxeno, clorita y biotita. (3ª) Riolitas y tobas riolíticas sobreyacen la unidad anterior, estas rocas

presentan diferentes texturas y grados de consolidación y tiene un espesor de 50 a 100 m, en un grado menor existen tobas vitrosas, tobas líticas, los minerales de alteración son cuarzo, clorita y a veces epidota, cabe mencionar que la alteración es muy incipiente. (4ª) Andesitas, dacitas, tobas andesíticas y ciertos niveles de tobas riolíticas, las cuales alcanzan espesores promedio de 800 m, con texturas porfírica y microlítica o traquítica, estas rocas presentan un mayor grado de alteración hidrotermal con hasta un 60% de minerales secundarios del total de la roca original, donde se observa epidota, clorita, feldespatos K, cuarzo, anfíbol, un poco de granate y clinopiroxeno. (5ª) sobreyaciendo la unidad anterior se encuentran rocas de composición acida compuestas de dos subunidades, la unidad más profunda está constituida por tobas riolíticas, riolitas esferulíticas e ignimbritas con espesores que varían de 200 a 500 m, la unidad superior está formada por tobas líticas acidas, con espesores que varían de 100 a 300 m. (6ª) Andesitas – Basálticas de textura afanítica y microlítica, es la última unidad importante, los minerales de alteración observados son: calcedonia, calcita, minerales arcillosos, cloritas y algunas zeolitas, el espesor de esta unidad varia de 150 m en el Colapso Central a 400 m cerca de Xalapazco, lo cual indica que el conducto de la erupción se encuentra en las proximidades de Xalapazco. (7ª) Esta unidad solo está presente en algunas partes del campo geotérmico y consiste en una capa muy delgada de tobas acidas

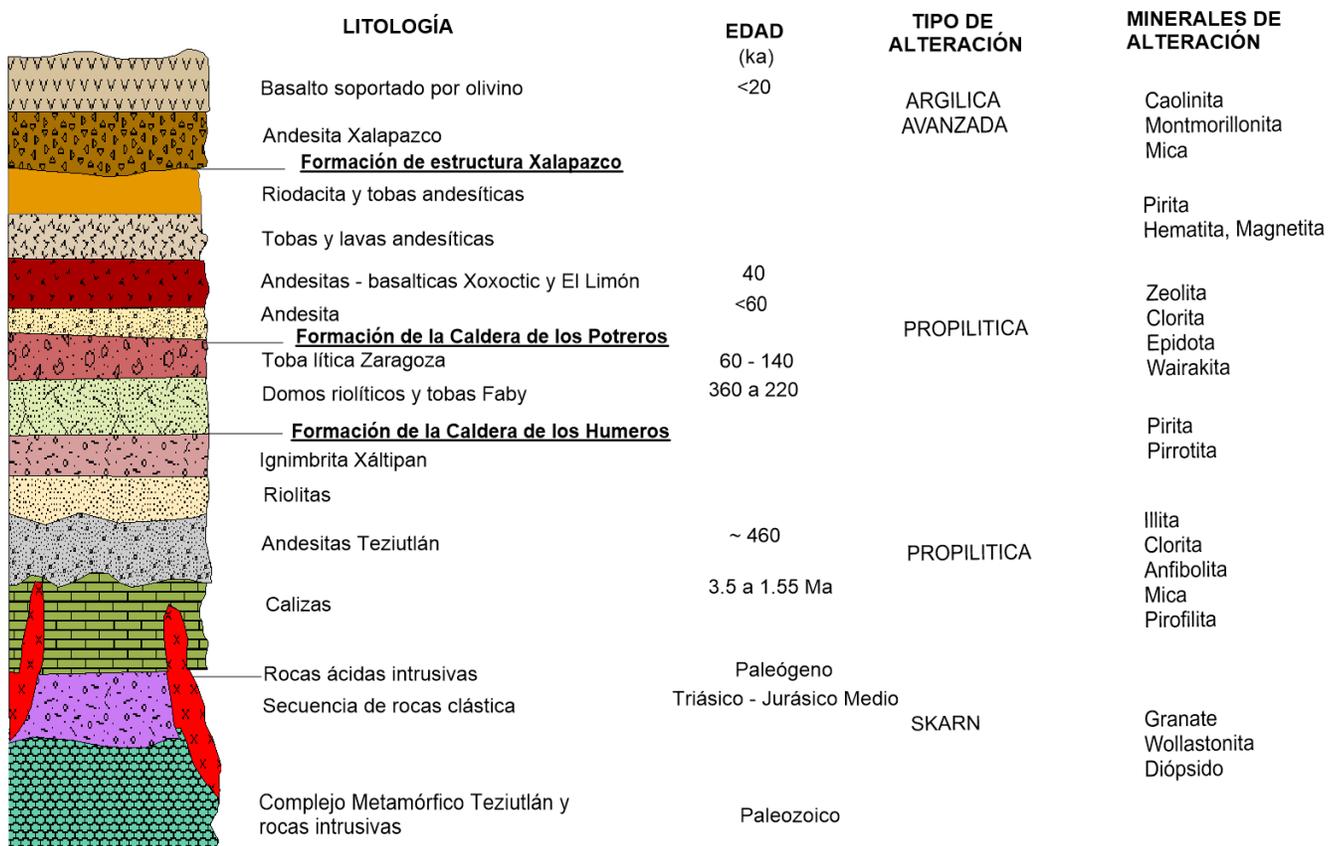


Figura 11. Columna Litoestratigrafía del campo Geotérmico Los Humeros, mostrando la edad de las rocas, la alteración de la roca y los principales minerales de alteración. Reconstruida a partir de la información de Yáñez G. (1980); Ferriz y Mahood (1984); Prol-Ledesma y Browne (1989); Martínez-Serrano y Alibert (1994) y Prol-Ledesma (1998).

sin consolidar, mezcladas con material aluvial y suelos actuales, los cuales presentan sílice amorfa, calcedonia, sulfatos, minerales arcillosos y azufre nativo.

Como se describió anteriormente la actividad calderica presenta como primeros productos rocas riolitas de alto sílice a riodacitas emplazadas entre ~ 0.46 Ma y ~ 0.22 Ma, seguidos por el emplazamiento de rocas andesíticas a riodacíticas entre 0.24 y 0.02 Ma, y finalmente basaltos de olivino emplazados a < 0.02 Ma, lo que sugiere una evolución magmática en el tiempo a composiciones más máficas. En esta secuencia, los magmas riolíticos de alto sílice dominan volumétricamente sobre los otros tipos de magma, donde las rocas más diferenciadas pertenecen a la serie calco-alcalina con alto contenido en potasio y son de carácter metaluminosas (Ferriz y Mahood, 1984; Ferriz, 1985; Gómez-Tuena *et al.*, 2007).

El sistema geotérmico se encuentra dentro de la caldera de Los Humeros, cuyo diámetro varía entre 14 y 21 km según diversos autores (Verma y López, 1982; González-Partida, 2001; Campos- Enríquez *et al.*, 2005) dicha caldera alberga dos colapsos Los Potreros, Colapso Central y una estructura volcánica Xalapazco (Campos- Enríquez *et al.*, 2005). Como todo sistema geotérmico convencional la fuente de calor es una cámara de magma parcialmente solidificada se estima está a una profundidad de 5-7 km (Castillo-Román *et al.*, 1991), donde una serie de ignimbritas cuaternarias de baja permeabilidad actúan como una capa sello para el yacimiento geotérmico (Hiriart, G., y Gutiérrez-Negrín, 2003).

V. INTERACCIÓN AGUA-ROCA

Las unidades litológicas descritas en el capítulo anterior, son cortadas por diversas fracturas y fallas formando cuencas (grabens) y pilares (horts) con un aspecto de un conjunto de bloques, mismos que son asociados con el proceso de formación del colapso calderico (Campos y Arredondo, 1992). Las fallas actúan como límites laterales de los fluidos geotérmicos siendo éste lugar por donde circulan la mayor cantidad de fluidos ya sean geotérmicos o superficiales.

La interacción fluido-roca provoca que algunos minerales modifiquen su equilibrio químico original (Arnorsson *et al.*, 1982; Fournier, 1977) provocando que los constituyentes primarios de la roca sean disueltos esencialmente por el metasomatismo del ion hidrogeno de donadores como el CO_2 disuelto (HCO_3), la sílice acuosa (H_4SiO_4) y el H_2S , generando así un fluido sobresaturado con algún mineral en particular que posteriormente por procesos dilución con fluidos más fríos, por enfriamiento, desgasificación, ebullición, etc., originen la depositación de minerales secundarios, produciendo que los constituyentes en el fluido tiendan a equilibrarse con los minerales de alteración que se encuentran precipitados, , los cuales representarían fases estables o metaestables a las nuevas condiciones físico -

químicas del sistema, mientras que los minerales de la roca primaria estarían bajo condiciones inestables. Una de las principales características que presenta el campo geotérmico Los Humeros, es la elevada fracción de vapor de agua con salmuera moderadamente ácida con un pH de 3 a 5 en los fluidos de los pozos (Bernard, *et. al.*, 2011) cuya presencia de fluido ácido es asociado a diversas causas como la actividad magmática del subsuelo, cambios naturales de temperatura, presión, la reactivación de fracturas, factores físico-químicos como la ebullición, la fugacidad de oxígeno, a la explotación e inyección de fluidos al reservorio y a la misma naturaleza del fluido ha provocado que la interacción que existe entre los fluidos geotérmicos con la secuencia estratigráfica del sistema de la caldera de Los Humeros genere que la concentración de HCl y HF aumentara (Prol-Ledesma, 1998), produciendo una variación significativa en la concentración de muchos iones, por ejemplo el cloruro ha variado de 1.4 a 982 ppm, mientras que el boro de 67 a 3169 mg/l esto ocasiona que las descargas de los pozos más profundos se mezclen aguas cloruradas con aguas bicarbonatadas producto de la interacción de aguas termales con a aguas superficiales, lo que ha llevado a modificar la condiciones del acuífero superficial (Tello-Hinojosa, 1992) manifestándose con la aparición y distribución de nuevos minerales (Martínez-Serrano y Dubois, 1998), donde el fluido ácido es en parte neutralizado por la rocas circundantes manifestándose en las zonas con alteración hidrotermal, el resto del fluido no neutralizado es descargado en forma de fumarolas y suelos calientes vaporizantes.

Este desequilibrio químico entre los constituyentes disueltos y los minerales de alteración a lo largo de la evolución del sistema geotérmico Los Humeros (González-Partida *et al.*, 1991; Martínez-Serrano, 2002) ha ocasionado que diversos pozos tengan que ser abandonados por corrosión severa y la obturación de los mismos por la precipitación de nuevos minerales (Martínez-Serrano, 2002). Existen diversas hipótesis sobre el origen de la acidez en el CGH, donde el principal factor es el desequilibrio químico agua - roca donde los componentes magmáticos en los fluidos geotérmicos asociados al vulcanismo reciente (altas concentraciones de arsénico y boro) no son neutralizados por reacciones con los feldespatos, calcita (andesitas o hornfels) y micas, ocasionando altas concentraciones de HCl y HF (Tello-Hinojosa, 2000).

V.I Comportamiento de la Alteración Hidrotermal Superficial

La superficie del área del campo geotérmico Los Humeros es considerado como un sistema abierto, con flujos, mezclas de vapor de agua, compuestos volátiles, aguas subterráneas poco profundas y aguas superficiales no térmicas, por lo tanto el proceso de interacción agua-roca se considera un proceso

geoquímico incongruente, con elementos lixiviados de los minerales primarios, mientras que otros se precipitan como minerales secundarios (Markússon y Stefánsson, 2011).

Las manifestaciones termales, así como los pozos de exploración y producción se encuentran localizados en un área de aproximadamente 35 km² llamada Colapso Central – Xalapazco donde existe un superficie de aproximadamente 3 km² que ha sido alterada principalmente por una intensa caolinización y sílice residual esta alteración es observada alrededor de la falla Los Humeros y en diversos pozos principalmente en el pozo H-4. El CGH se caracteriza por no presentar manantiales calientes en superficie ni presentar descargas laterales evidentes como en la mayoría de los sistemas geotérmicos asociados a una cámara magmática (Los Azufres, Mich.) de esta manera la alteración hidrotermal de esta zona debió formarse principalmente por la interacción de vapor de origen profundo con aguas someras y la circulación de fluidos por la fallas principales del sistema, dando origen a aguas sulfatadas ácidas con pH ácido, con esto se origina como consecuencia una alteración argílica (Tello-Hinojosa, 2005), siendo esto muy probable debido a que esta zona se encuentra 1,000 m arriba de los alrededores del Valle de Perote donde el nivel freático es muy somero (Viggiano y Gutierrez, 1995).

V.II Comportamiento de la Alteración Hidrotermal Profunda

El campo geotérmico Los Humeros presenta una distribución gradual de la alteración hidrotermal ligada a la temperatura, con dos características peculiares, la primera de ellas es la alteración tipo skarn con una composición de granate + wollastonita + schelita + vesuvianita la cual se encuentra en la parte más profunda del sistema, la segunda zona presente solo en ciertos sectores del campo geotérmico como es el caso del pozo H-43 (>1,800 m), donde las temperaturas superan los 350°C, se presentan arcillas y minerales de alteración como la pirofilita, sericita, anhidrita, biotita y pirrotita (Prol-Ledesma, 1998).

Diversos estudios de mineralogía de alteración (Prol-Ledesma, 1989; Martínez-Serrano y Alibert, 1994; Martínez-Serrano, 2002) identificaron la aparición de al menos dos episodios térmicos en el sistema geotérmicos Los Humeros. El primer episodio se produjo a poca profundidad (<1,000 m), con una intensa actividad hidrotermal y temperaturas >250°C, durante este episodio los minerales de alta temperatura como la epidota (>180°-250°C), anfíboles (>280°-300°), granate (>325°-350°C) y micas (>350°-400°C) fueron depositados en niveles someros, y aunque no se ha determinado la edad de los minerales secundarios se ha considerado que el granate, la wollastonita y el clinopiroxeno de la asociación de skarn podrían haberse depositado al mismo tiempo en la parte inferior del depósito; el segundo período fue el sellado de las principales formaciones rocosas permeables produciendo una disminución de la interacción

agua-roca a poca profundidad, aunado a la depositación de minerales de baja temperatura, como illita-clorita (>100°-200°C) caolinita-montmorillonita (<150°-200°C) (Martínez-Serrano, 2002).

Estudios realizados por Martínez-Serrano y Alibert-Chantal (1994) en los pozos H-15, H-16, H-17, H-19 y H-12, permitieron determinar que los principales minerales de alteración están alojados en cavidades, porosidades de las rocas, vetillas o como sustitución de minerales primarios, los cuales se encuentran distribuidos espacialmente de la siguiente forma: en las partes profundas >1,900 m se observaron fases minerales de biotita, granate, anfíbol y clinopiroxeno cuyas asociaciones paragenéticas son estables a temperaturas superiores a >300° C, mientras que en las partes intermedias entre 1,700 y 1,800 m se observó una cantidad importante de epidota, clorita, cuarzo, feldespato K, pirita y calcita, estas asociaciones paragenéticas indican una temperatura de estabilidad de 150 a 270 ° C; Martínez-Serrano (1993) considera que debido a la abundancia y distribución de estas fases minerales es en estos intervalos donde se sitúa el reservorio principal del sistema. Finalmente en las partes superficiales <700 m se observaron minerales como pirita, calcita abundante, clorita, cuarzo, minerales arcillosos, zeolitas, óxidos de hierro, sílice amorfa y azufre nativo, con temperaturas de estabilidad de 90° a 170°C. La distribución de los minerales hidrotermales es similar a las isothermas locales actuales, apoyando la hipótesis de que las condiciones térmicas del sistema se han mantenido constantes durante un tiempo suficientemente largo (González-Partida, 1991).

V.III Petrografía y Minerografía

Estudios petrográficos y minerográficos llevados a cabo en el CGH por Viggiano y Robles (1988a), Prol-Ledesma y Browne (1989), Prol-Ledesma (1991), Izquierdo (1993), Martínez-Serrano y Alibert (1994), Prol-Ledesma (1998) y Tinoco (2008), mostraron que la secuencia de rocas volcánicas fueron y están siendo afectadas por la circulación de fluidos geotérmicos con temperaturas >290°C y con menos de 2500 mg/kg de sólidos disueltos totales, transformando los minerales primarios de la roca a minerales más estables a las condiciones físico-químicas. Los análisis químicos de los fluidos descargados de los pozos sugieren que se trata de una salmuera de baja salinidad resultante de la mezcla entre fluidos geotérmicos y aguas subterráneas someras (Tello, 1992; Barragán *et al.*, 1991), donde la intensidad de la alteración hidrotermal está íntimamente relacionada con las fallas, ya que en esta zona se muestra un incremento en la alteración total lo cual evidencia una falta de equilibrio químico en la relación agua-roca (Prol-Ledesma, 1998).

Los principales minerales de alteración hidrotermal observado en el CGH son cuarzo, calcita, caolinita, illita, clorita, zeolitas, anfíboles (actinolita), azufre nativo, sulfatos, clinopiroxenos (diópsido), feldespato

potásico (adularia) , biotita, granate, sulfuros (pirita y pirrotita), y óxidos de hierro (magnetita y hematita), en menor cantidad se observa wairakita, titanita, formando asociaciones paragenéticas bien

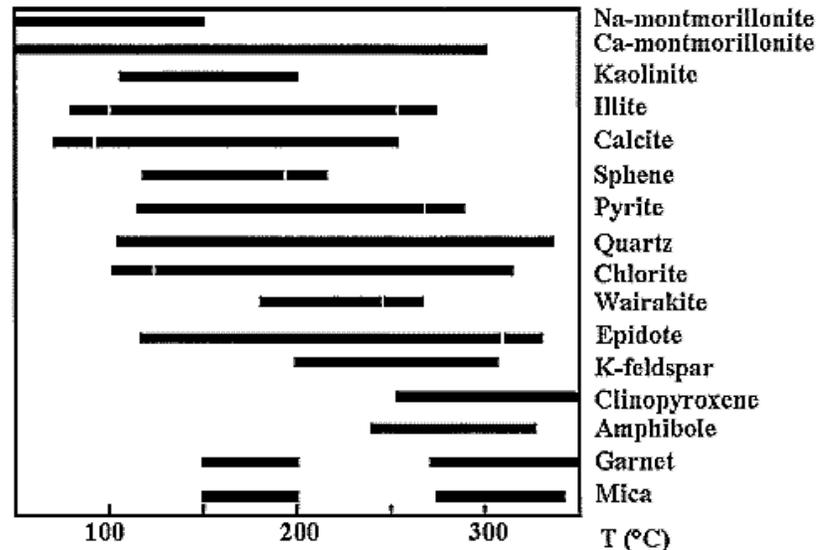


Figura 12. Paragénesis de minerales de alteración transparentes y opacos del campo geotérmico Los Humeros en esquirlas de diferentes pozos perforados. Tomado de Prol-Ledesma (1998).

definidas (Figura 12). La epidota es uno de los minerales más ampliamente distribuidos en el campo y está presente en zonas donde las temperaturas medidas directamente en pozo son de 120 a 250 °C, indicando que debió de haberse formado durante etapas de mayor temperatura, en el caso de las zeolitas han sido identificadas coexistiendo con granates y micas en pozos como el H-19, H-21 a profundidades de 900 y 980 m respectivamente el granate está incluido en vetas a estas profundidades pudiendo ser depositado por un proceso de telescpeo debido a que la estabilidad de este mineral está por encima de los 300°C (Prol-Ledesma, 1991; Izquierdo 1993; Martínez-Serrano y Alibert, 1994; Prol-Ledezma, 1998; Tinoco, 2008).

V.IV Inclusiones Fluidas

Durante las etapas de exploración y explotación del campo geotérmico Los Humeros, se han realizado en 43 de los 46 pozos perforados estudios microtermometría de inclusiones fluidas por González-Partida, (1985); Prol-Ledesma y Browne, (1989); González-Partida, (1991); González-Partida *et. al.*, (1996); Prol-Ledesma, (1998); González Partida *et al.*, (2009), así como diversas interpretaciones de los datos obtenidos (Izquierdo, *et. al.*, 2008; Gutiérrez-Negrín e Izquierdo-Montalvo, 2010).

En donde la mayoría de las inclusiones fluidas (IF) medidas en el campo geotérmico Los Humeros son de carácter bifásico, las cuales han sido agrupadas en cuatro tipos: 1) primarias ricas en líquido (L+V) , 2) primarias ricas en vapor (V+L), 3) secundarias (posteriores a la cristalización) ricas en liquido (L₂+V) y tipo 4) inclusiones con hidrocarburos presente solo en el pozo H-14 a 1385 m de profundidad (Prol-Ledesma,

1998); sin embargo existen excepciones en niveles profundos donde se han reconocido inclusiones monofásicas (V). Las IF del CGH presentan baja salinidad y en general las temperaturas de homogenización aumentan progresivamente con respecto a la profundidad, sin embargo la temperatura de homogenización (T_h) es más alta que la temperatura estabilizada medida en el pozo, excepto para los pozos H-8 (1,410 m) y H-14 (1,385); en algunas IF se muestra un descenso de temperatura después de la unidad litológica compuesta por toba vítrea o andesita de hornblenda, ésta puede estar relacionada a un proceso de ebullición antes de la explotación del yacimiento (Izquierdo, *et. al.*, 2008), cabe mencionar que las muestras analizadas de inclusiones fluidas corresponden a minerales secundarios de cuarzo, calcita, epidota tanto de núcleos como de esquirlas, donde en ninguna de las muestras se hicieron presentes cristales hijos.

Los pozos ubicados en colapso Los Potreros (H-1, H-2, H-4, H-5, H-8, H-9), en la zona de colapso central (H-19, H-20, H-21 y H-22) y dentro del anillo de la caldera (H-14), presentaron inclusiones fluidas (IF) bifásicas ricas en líquido, excepto H-14 que presenta IF con hidrocarburos (González-Partida, 1985, Prol-Ledesma, 1998).

En la sección norte-sur (H-15, H-17, H-16, H-4, H-40 y H-39) presentada por Tinoco en 2008, los pozos del sector sur a profundidades de 2,100 m tienen valores de $T_m = -0.4$ a -0.0 °C, lo que equivale a salinidades aparentes de 0.71 a 1.57 % peso eq. NaCl; mientras que la zona de los pozos relacionados a la falla Humeros presentan $T_m = -0.1$ a -0.2 °C, equivalente a 0.18 a 0.35 % peso eq. NaCl y a medida que el fluido es más somero se presenta un cambio en las T_m , pasando de -0.3 a -1 a una temperatura de -2 °C ($\cong 1.74$ a 3.39 % peso eq. NaCl), donde en los primeros 400 m las T_m son de $+1.5$ °C, lo que muestra una posible descarga de gases, principalmente de CO₂.

Dentro del colapso Los Potreros los datos de inclusiones fluidas son congruentes con la interpretación basada en la mineralogía de alteración observada por Viggiano y Robles (1988a), en donde las temperaturas de homogeneización no muestran evidencia de múltiples eventos térmicos, mientras que los pozos situados en las proximidades de la falla Los Humeros presentan un efecto peculiar de la inversión en el gradiente de temperatura por debajo de cierta profundidad, donde los datos de la inclusión de líquidos del pozo H-8 muestran claramente una disminución significativa en la temperatura de homogeneización con el aumento de la profundidad siendo de 288 °C a 1410 m, y 254 °C a 1724 m (Prol-Ledesma, 1998).

Los resultados obtenidos por Prol-Ledesma y Browne (1989) con base a la mineralogía de alteración y los datos de inclusiones fluidas muestran que el área que comprende el Colapso central y su alrededor parece ser la parte más térmicamente inestable del campo con temperaturas de hasta 340 °C en donde la dilución

que presentan las IF en los diagramas Th vs Tm en esta zona indica que el agua caliente asciende a través de fallas en el área de Colapso Central la cual se mueve lateralmente hacia fuera a otro lugar dentro de la caldera. La temperatura de fusión de las inclusiones fluidas también indica un proceso de dilución que tiene lugar en profundidad y salinidad aparente baja, siendo el más alto 2,7% peso eq. de NaCl y la más baja de 0,2% peso eq. de NaCl para un grupo de inclusiones del H-19 a 1769 m de profundidad. La alta salinidad aparente es característica de las inclusiones con la más alta temperatura de homogeneización y el fluido atrapado en las inclusiones con temperaturas de homogeneización de baja salinidad baja debió estar sometido a ebullición y pérdida significativa de CO₂.

El diagrama que muestra los diversos procesos de evolución de los fluidos (Figura 13) presentado por Prol-Ledesma (1998) donde grafica la Th vs Tm, propone un fluido padre o progenitor con una temperatura de 350°C, el cual tiene una aparente salinidad de 2.7% peso eq. de NaCl (Tm = -1,6 ° C) debido principalmente a un alto contenido de CO₂ que después de la ebullición la salinidad aparente en la misma muestra se reduce a 0.2% eq. en peso de NaCl, la mezcla con agua fría y su consecuente dilución es observada en el pozo H-1 y H-8, mientras que los fluidos que han sido objeto de una sola etapa de ebullición se identifican con base a un aparente incremento de salinidad y temperatura en pozos H-9, H-19 y H-21. Después de la pérdida inicial del CO₂ la continua ebullición está representada por la tendencia general de las muestras a partir de profundidades mayores a 1000 m, en comparación a las muestras superficiales y hacia el límite de la caldera (H-14).

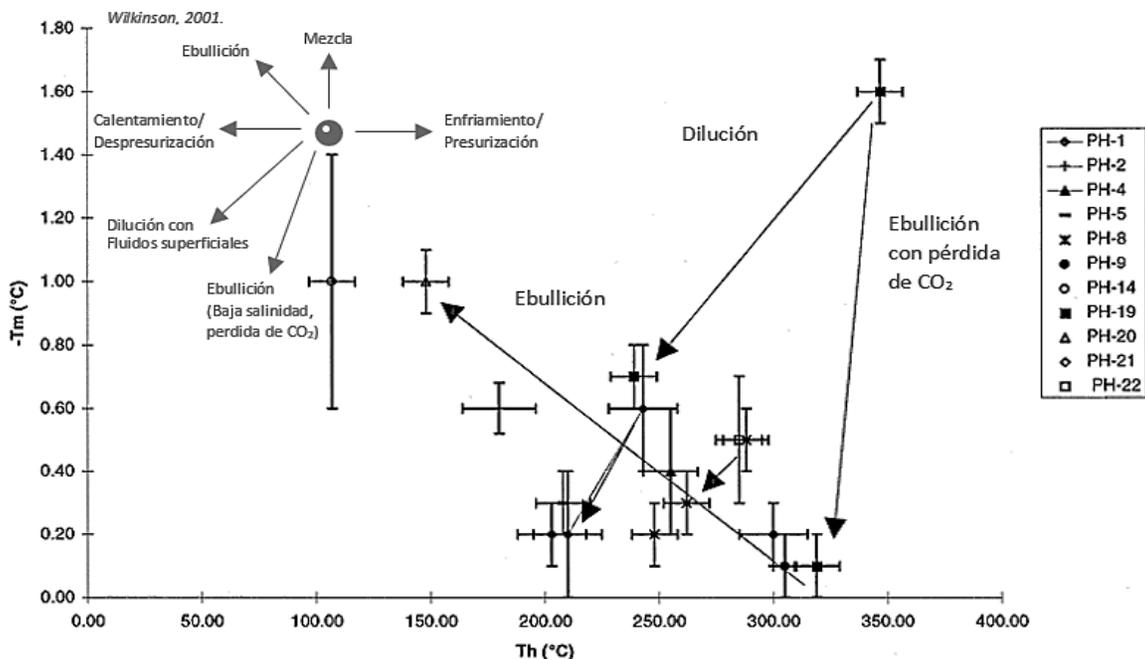


Figura 13.- Temperatura de fusión (-Tm) contra temperatura de homogeneización (Th) de las inclusiones fluidas de 11 pozos del campo geotérmico Los Humeros (editado de Prol-Ledesma, 1998)

V.V Movilidad Elemental mediante la ecuación de Grant (1986)

Para determinar la movilidad elemental ocasionada por el hidrotermalismo en el campo geotérmico de Los Humeros utilizaremos la ecuación de Grant (1986), que deriva de la ecuación calculada por Gresens (1967) en el que el volumen (V) y la densidad (ρ) hacen referencia a la masa (M), masa = volumen x densidad, la ecuación de Gresens para el balance de masas relaciona el volumen y composición, la cual está dada por:

$$F_v \left(\frac{\rho^a}{\rho^o} \right) C_n^a - C_n^o = \Delta X_n \quad (1)$$

donde los superíndices o y a hacen referencia al protolito o roca menos alterada (o) y a la roca alterada (a) respectivamente, C_n^a y C_n^o son la concentración del elemento n en la roca alterada y el protolito respectivamente, ΔX_n es el cambio de masa ganada o perdida en el elemento n , y F_v es el factor de volumen (es decir la proporción de volumen final con respecto al volumen inicial ($F_v = V^a/V^o$)).

Si el cambio de volumen está dado por cualquier elemento inmóvil i (F_v^i) este puede ser obtenido por la sustitución de $X_n=o$ en la anterior ecuación quedando como:

$$F_v^i = \frac{C_i^o}{C_i^a} \times \frac{\rho^o}{\rho^a} \quad (2)$$

donde F_v^i es el factor de volumen isoquímico del elemento i .

La ecuación (1) puede ser escrita como:

$$\begin{aligned} \left(\frac{V^a}{V^o} \right) \left(\frac{\rho^a}{\rho^o} \right) C_n^a - C_n^o &= \Delta X_n \\ \left(\frac{M^a}{M^o} \right) C_n^a - C_n^o &= \Delta X_n \\ C_i^a &= \frac{M^o}{M^a} (C_i^o + \Delta X_n) \end{aligned} \quad (3)$$

En este caso los elemento inmóviles i , la $\Delta X=o$,

$$C_i^a = \frac{M^o}{M^a} C_i^o \quad (4)$$

Esta ecuación puede ser considerada como la notación estándar de

$$Y = mX + C \quad (5)$$

La cual corresponde a la ecuación de una línea recta cuya pendiente (m) está definida por $m=(M^o/M^a)$, pasando por el origen ($C=o$), cuya pendiente en la relación fundamental de masa que no muestra perdida o ganancia, definiendo los elemento inmóviles, esto puede hacerse gráficamente trazando en

el eje de las abscisas ($X=C^n$,) las concentraciones de los elementos del protolito versus las concentración de los elementos de la roca alterada, en el eje de las ordenadas ($Y=C^a$), (Mukherjee and Gupta, 2008). Esta línea es llamada isocona (Grant, 1986), también es llamada como la línea que conecta a puntos con igual concentración geoquímica (Gary *et al.*, 1974), de esta forma la movilidad de los restantes componentes puede ser analizada a partir de la isocona surgida de los elementos relativamente inmóviles de comportamiento geoquímicos similar (Martínez y Dristas, 2007).

La ecuación (4) es la que obtuvo Grant en 1986, establece las variaciones en la concentración-volumen de un elemento, la cual una vez identificando los elementos inmóviles i , para lo cual $\Delta X=0$, M^0 y M^a puede ser obtenida resolviendo el conjunto de ecuaciones simultáneamente de la forma:

$$C_i^a = \frac{M^0}{M^a} C_i^0$$

En donde la pendiente de la isocona, es la que determina el cambio de masa de M^0 , la cual se puede determinar por la agrupación de los datos C_i^a / C_i^0 y por la asunción de la masa constante, cuyos elementos encontrados por encima de la isocona son lo que habrán sufrido ganancia, mientras que los que se encuentren por debajo, habrán experimentado pérdida (Grant, 1986; Grant, 2005; Rubinstein *et al.*, 2013), la pérdida o ganancia se obtiene por el desplazamiento de los elementos móviles tomando como referencia la isocona, por que se tendría que dividir ambos lados de la ecuación (3) por C_i^0 :

$$\frac{C_i^a}{C_i^0} = \frac{M^0}{M^a} \left(\frac{C_i^0}{C_i^0} + \frac{\Delta X_n}{C_i^0} \right)$$

Acomodando la ecuación anterior, se obtiene la ecuación para determinar la pérdida o ganancia:

$$\left(\frac{\Delta X_n}{C_i^0} \right) = \left(\frac{M^a}{M^0} \right) \left(\frac{C_i^a}{C_i^0} \right) - 1 \quad (6)$$

donde:

C_i^0 = concentración inicial del protolito

C_i^a / C_i^0 = son las concentraciones de los elementos inmóviles i ,

M^0 / M^a = es la relación de la masa antes de la alteración y después de la alteración (pendiente de la línea de isocona) obtenida mediante el mejor ajuste por mínimos cuadrados.

VI MÉTODOS Y MATERIALES.

VI.I Trabajo de Campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en una sola campaña de 5 días, realizada en el mes de Julio del 2014, con una brigada de 7 geólogos, 3 técnicos y el Dr. González Partida, apoyándonos con imágenes satelitales, mapas geológicos y el equipo necesario de campo, se realizó el reconocimiento general del campo geotérmico Los Humero, observando con mayor atención la alteración hidrotermal del entorno, las estructuras geológicas mayores, la litología del lugar y a partir de un muestreo sistemático con dos diferentes escalas, una regional y una local, se obtuvieron datos con el fin de poder visualizar de manera precisa los procesos de interacción agua-roca que se están llevando a cabo en la zona.

El muestreo se realizó mediante una retícula regional de 9 x 9 km, en donde se recolectó una muestra de roca alterada o en su defecto de roca fresca, esto se hizo aproximadamente a cada kilómetro, recolectando así un total de 69 muestras (Figura 14), el muestreo local se realizó sobre una de las zonas productoras del campo geotérmico en malla de 2 x 3.5 km recolectando una muestra aproximadamente cada 100 metros de roca alterada o fresca, obteniendo un total de 323 muestras (Figura 14). Para la caracterización de la alteración hidrotermal se recolectaron 12 muestras de roca alterada tomadas en fuentes activas y en el escarpe de las fallas, 3 muestras de rocas inalteradas que corresponden al mismo tipo de roca, a las cuales nos referiremos como muestras especiales. El control del muestreo se realizó tomando como premisa que para realizar un correcto balance de masas las muestras de rocas tanto alteradas como inalteradas deben corresponder al mismo tipo de roca y evento volcánico.

VI.II Trabajo de Laboratorio

Las muestras regionales (69), locales (323) y las muestras especiales (12 muestras de rocas alteradas y 3 muestras de rocas inalteradas) se prepararon en el Taller de Molienda y Pulverizado del Centro de Geociencias de la UNAM, en el campus Juriquilla, Qro., la trituración se realizó con una prensa neumática de marca Montequipo mod. LAB-20T-3HP, con capacidad de 2,500 kg/cm², posteriormente se tamizó la muestra con un equipo U.S Standard Sieves con apertura del no. 100 equivalente a 150 micrones, aquí las muestras se cuartearon con la finalidad de obtener mejor representatividad, hasta obtener aproximadamente 50 gr; las muestras con contenido de humedad se secaron en un horno de secado de gran volumen (102x82x65 cm) marca Rio Rocha mod. Hs-102, a una temperatura de 40°C por 12 horas. Finalmente las muestras se guardaron en bolsas etiquetadas para su posterior análisis por fluorescencia de rayos X por dispersión de energías. Para el tratamiento de las 15 muestras especiales se utilizó un

equipo Shatterbox de 825 r.p.m, con una pulverizadora de alúmina marca SPEX dejando cada muestra por 3 minutos, alcanzando así la malla 200 que es el equivalente a 75 micrones, con las muestras homogenizadas se procedió a realizar su análisis por diferentes técnicas como son: Espectroscopia de Masas de Acoplamiento Inductivo, Difracción de Rayos X, Espectroscopia de Reflectancia de infrarrojo de onda corta y fluorescencia de rayos X por longitud de ondas .

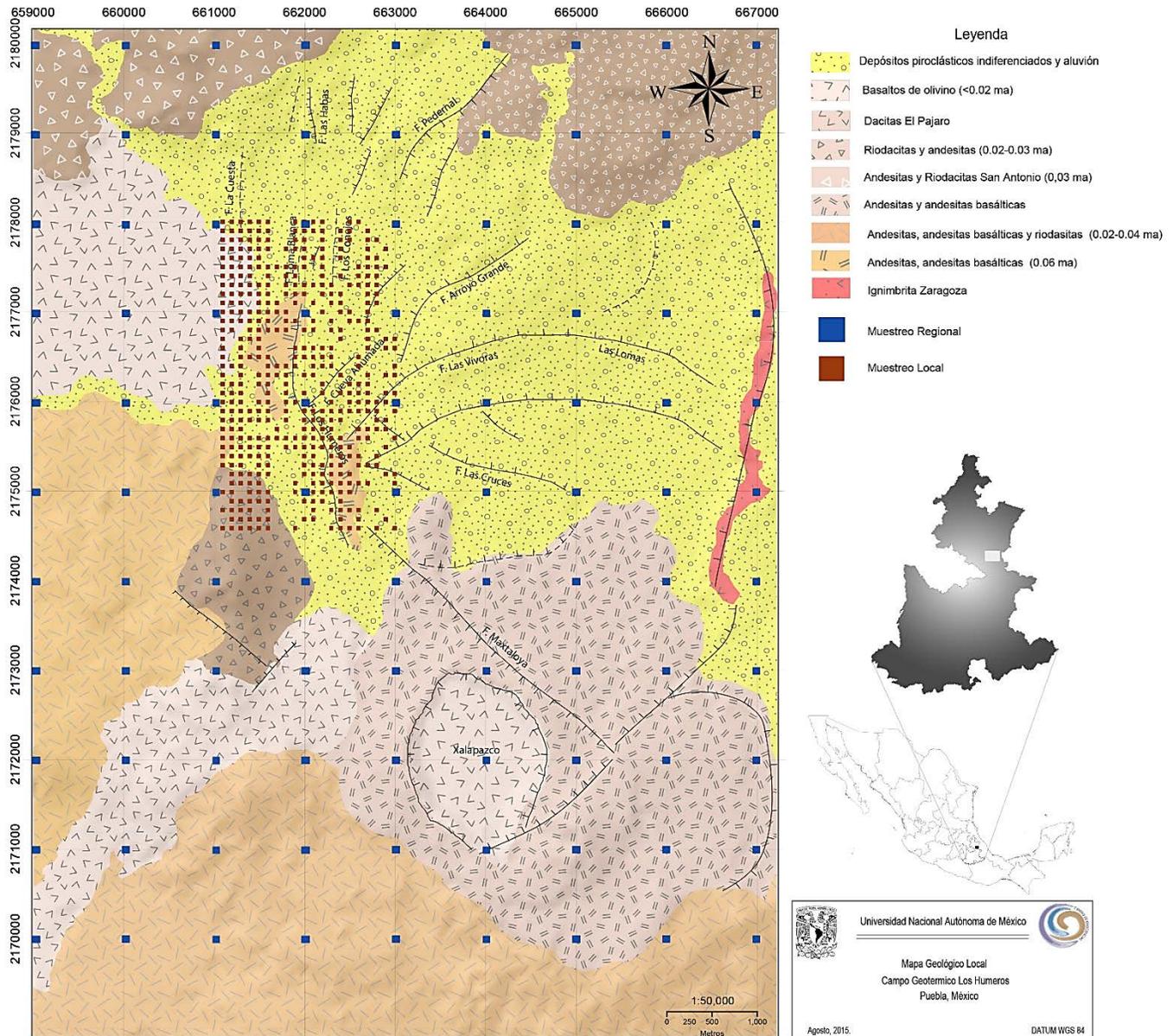


Fig. 14.- Mapa del campo geotérmico Los Humeros, mostrando la geología local y el muestre sistemático llevado a cabo durante el trabajo de campo.

VI.III Métodos Analíticos

VI.III.I Fluorescencia de Rayos X (FRX-WD)

Se utilizó la técnica de FRX-WD con la finalidad de determinar elementos mayores de las 15 muestras especiales. Los análisis se realizaron siguiendo los procedimientos descritos por Lozano-Santa Cruz *et al.*

(1995), Verma *et al.* (1996), usando los materiales de referencia de Lozano y Bernal (2005), en el laboratorio de Geoquímica en el Instituto de Geología de la UNAM, en Ciudad Universitaria en la Ciudad de México, el equipo utilizado fue un espectrómetro secuencial de rayos X de marca Siemens SRS-3000 equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 125 micras.

VI.III.II Fluorescencia de Rayos X (FRX-ED)

Los análisis de las muestras regionales (69) y locales (323) se realizaron por la técnica de espectrometría de fluorescencia de Rayos X de dispersión de energía (ED-FRX), este se llevó a cabo en el Laboratorio de Yacimientos Minerales del Centro de Geociencias de la UNAM en el campus Juriquilla, Qro; el equipo utilizado fue un espectrómetro de rayos X portátil Niton XL3t GOLDD+, sus características son: ánodo de Ag, voltaje de 50 KW_{Max}, fuente de poder de 10 W_{Max} y con un área del detector de 25 mm².

Para garantizar la confiabilidad de los resultados analíticos obtenidos mediante el equipo portátil de FRX Niton XL3t GOLDD+, se calibro el equipo mediante el método "sin-estándares", el cual equivale a trabajar con estándares seleccionados independientemente de las muestras a ser analizadas, por lo tanto no serán llamados estándares sino muestras de referencia geoquímicas, los materiales de referencia fueron realizados por Lozano y Bernal (2005). El análisis de elementos mayores y trazas utilizo matrices de muestras geológicas típicas de la serie IGL, compuesta de un suelo laterítico (excluida), una dolomía, una caliza, una andesita, tres diferentes tipos de sienita y un gabro, todos ellos colectados en diferentes localidades de México.

A continuación se describe brevemente los pasos que se siguieron durante las mediciones con el equipo Niton XL3t GOLDD+ y cómo funciona el detector:

1. Se calibró el equipo con los materiales de referencia obtenidos de Lozano y Bernal (2005), los resultados y curvas de calibración se encuentran en el **Anexo I**.
2. Las muestra se introduce en un recipiente de polipropileno, previamente lavado y enjuagado con agua desionizada con una resistividad de 18.2 MΩ, usando una película de polipropileno con un calibre de 4μ de grosor y 2.5" de diámetro.
3. Con base a lo publicado por Hall *et al.* (2014) se dejó irradiar por 60 segundos cada filtro del equipo (principal, alto, bajo y liviano).
4. Los resultados se obtuvieron en composición química en porcentaje (%) o en partes por millón (ppm), dependiendo de cada elemento.

VI.III.III Espectroscopia de Masas con Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP-MS)

Se utilizó ICP-MS para determinar tierras raras (REE) como elementos traza. El análisis se realizó con un espectrómetro de masas de analizador cuadrupolar con fuente de plasma acoplado inducido (Q-ICP-MS) Termo ICap Qc, en el cual esta acoplado a una celda de colisión/reacción (He, N₂, NH₃ y O₂) para reducir interferencias espectrales. Las mediciones fueron realizadas en el laboratorio de Estudios Isotópicos en el Centro de Geociencias de la UNAM, en el campus Juriquilla, Oro., donde se obtuvieron los elementos trazas y las tierras raras (REE) de las 15 muestras especiales.

La digestión de la muestra se llevó a cabo en el Laboratorio Ultralimpio el cual está libre de metales (clase 100-1000), usando reactivos de alta calidad, balanza de precisión, agua desionizada con resistividad de 18.2 MΩ, campanas de extracción y flujo laminar (clase 10), el procedimiento utilizado es el descrito por Mori *et al.* (2007).

VI.III.IV Petrografía y Mineralogía

Para el análisis de las muestras petrográficas y minerográficas se utilizó un microscopio marca LEICA con aumentos de 10x, 20x, 40x y 80x, mediante luz transmitida y luz reflejada respectivamente. La preparación de las muestras se llevó a cabo en el taller de Laminación del centro de Geociencias de la UNAM, en el campus Juriquilla, Oro., a grandes rasgos la preparación de las muestras consiste en:

1. Selección y corte de las muestras, en briqueta el corte es redondo, en lámina delgada el corte es rectangular
2. Para las láminas delgadas la muestra se monta en los portaobjetos y usando pegamento epóxico para fijarlas, se deja secar en luz ultravioleta; posteriormente se desbastan las muestras con diferentes tamaños de abrasivos, en el caso de lámina delgada se desbasta hasta obtener un grosor de 30 micras.
3. Para el tratado de briquetas pulidas, estas se sumergen en resina, en un molde cilíndrico, se deja secar y se sacan del molde, finalmente se desbasta hasta quedar perfectamente pulidas y tener una superficie de espejo.

VI.III.V Espectroscopia de Reflectancia de Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)

Las 15 muestras especiales se analizaron mediante la espectroscopia de Reflectancia llevado a cabo en el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM, en Ciudad Universitaria en la Ciudad de México, usando un espectrómetro de infrarrojo portátil marca LabSec Pro. Para este estudio se utilizó el rango de infrarrojo de onda corta SWIR (1300-2500 nm) (Canet *et al.*, 2015), debido a que este

rango es sensible a ciertas moléculas y radicales como OH, H₂O, CO₃, NH₄ y enlaces OH de cationes como Al-OH, Mg-OH y Fe-OH (Thompson *et al.*, 1999; Hauff, 1994), siendo esta técnica la ideal para determinar minerales de alteración hidrotermal.

El método de análisis es directo, se mide sobre la muestra o en este caso sobre el polvo (150 micrones) mediante el SWIR, de este modo la muestra se irradia directamente y se toma la lectura de la reflectancia mediante un software llamado ImagenProll donde se grafica la longitud de onda (nm) vs la reflectancia relativa es finalmente comparada con una base de datos de forma manual o con el software es ENVI 4.5 (conversación vía correo electrónico con candidato a Dr. Rodríguez-Díaz, 2015).

VI.III.VI Difracción de Rayos X (DRX)

La identificación cualitativa de las fases de la alteración hidrotermal de 12 de las 15 muestras especiales se realizó mediante la técnica de difracción de rayos X en polvos, cuyo agregado está orientado al azar. El análisis se realizó en el laboratorio de geoquímica de fluidos corticales, dentro del centro de Geociencias de la UNAM, en el campus Juriquilla, Qro; el equipo utilizado fue un difractor marca Rigaku Miniflex, las condiciones de trabajo fueron 35kw, 20mA, con un Angulo 2θ de 2-70° en pasos de 0.02° y de 2s de tiempo de integración, utilizando radiación CuK y monocromador de grafito.

VI.III.VII Inclusiones Fluidas

Estas fueron analizadas en el Centro de Geociencias de la UNAM en el campus Juriquilla, Qro., con un equipo microtermométrico que consta de una platina calentadora y refrigerante marca Linkam THMSG 600 con 3 consolas programables que regulan la temperatura, un microscopio petrográfico marca Olympus BX51, con fuente de luz de 150w y sistema de video AxionCam ERc5C acoplado al microscopio con visualización hacia una pantalla HD de 42'' marca Sony. El estudio óptico de las inclusiones fluidas se realizó principalmente en minerales translucidos cuarzo, calcita, epidota.

En el análisis únicamente se trabajó con IF primarias con tamaños <10 μ, preferentemente de 3-5 μ, previamente separadas por petrografía de IF, posterior a esto con la finalidad de evitar algún tipo de modificación en las IF, se determinó la temperatura de fusión y después la temperatura de homogenización, obteniéndose un promedio de 16 datos por muestra.

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VII.I Inclusiones Fluidas

“La mayor contribución de inclusiones fluidas radica en el impacto sutil pero penetrante que han tenido en la filosofía básica de exploraciones”
Ed Roedder, 1984.

Se realizó una síntesis de los estudios previos de inclusiones fluidas (Tabla 3) realizados en el CGH por González-Partida, (1985); Prol-Ledesma y Browne, (1989); González-Partida, (1991); González-Partida, *et. al.*, (1996); Prol-Ledesma, (1998); González-Partida, Pérez R. y Tinoco J., (2009). A partir de los datos obtenidos se recalculo la salinidad con base al logaritmo presentado por Bakker (2012) para soluciones H₂O-NaCl-KCl, las cuales modela las ecuaciones polinómicas de temperatura, presión y composición obteniendo un mejor ajuste “best-fit”. A estos datos se anexaron los resultados de las profundidades estimadas con base al modelo de salinidad variable por ebullición publicado por Cruz-Pérez *et al.*, (2016), y los resultados obtenidos de las inclusiones fluidas de los pozos H-41, H-42 y H-42.

Tabla 3. Síntesis de los análisis diversos estudios de inclusiones fluidas realizados en el CGH, junto a los nuevos datos obtenidos de la salinidad y profundidad estimada, así como los resultados analizados de las inclusiones fluidas de los pozos H-41, H-42 y H-42. Nota los datos nuevos están marcados en color verde.

Profundidad real	Pozo H4 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rando de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
300	Ca	192 a 230	209 (11)	-0.1 a -1.1	-0.7(11)	1.15	312
500	Qz	191 a 252	222 (8)	-0.1 a -0.4	-0.2 (9)	0.33	372
600	Ca	220 a 227	222 (4)	-0.5	-0.5 (4)	0.82	371
650	Qz	255 a 265	260 (3)	-2 a -2.5	-2.1 (4)	3.43	693
700	Qz	223 a 251	235 (9)	-0.2 a -3.1	-1.9 (5)	3.11	469
750	Qz	210 a 263	243 (11)	-4 a -0.3	-2.2 (11)	3.59	550
850	Qz	205 a 320	274 (3)	-1.6 a -2.3	-1.9 (3)	3.11	867
1050	Ca	243 a 327	302 (17)	-1.7 a -3.1	-1.9 (17)	3.23	1242
1250	Ep	321	321 (11)	-0.2	-0.2	0.33	1688
1450	Ep	336	336	-0.3	-0.3	0.49	2080
1550	Ep	312 a 365	336 (10)	-0.2	-0.2 (10)	0.33	2080

Profundidad real	Pozo H5 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rando de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
600	Qz	188 a 244	208 (24)	-0.1 a -0.5	-0.3 (18)	0.49	286

Profundidad real	Pozo H8 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rando de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
1410	Ca	264 a 307	288 (25)	-0.2 a -1.2	-0.5	0.82	1022
1724	Ca	245 a 287	262 (12)	-0.1 a -0.5	-0.3	0.49	706

Profundidad real	Pozo H15 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
410	Qz	144 a 150	145 (4)	-0.3 a -0.3	-0.3 (4)	0.49	82
510	Qz	154 a 210	185 (16)	-0.3 a -0.3	-0.3 (16)	0.49	198
610	Qz	185 a 200	190 (2)	-0.1 a -0.3	-0.2 (2)	0.33	218
710	Qz	185 a 210	190 (6)	-0.6 a -0.6	-0.6 (16)	0.99	218
810	Qz	186 a 250	217 (8)	-1.1 a -1.1	-1.1 (8)	1.81	338
910	Qz	195 a 255	218 (12)	-0.6 a -0.6	-0.6 (12)	0.99	339
1010	Qz	206 a 270	229 (16)	-0.3 a -0.6	-0.5 (16)	0.82	439
1110	Ca	218 a 240	231 (11)	-1.2 a -1.5	-1.3 (11)	2.14	435
1210	Qz	250 a 290	261 (16)	-1 a -1.8	-1.4 (16)	2.3	698
1310	Qz	297 a 320	307 (13)	-1.1 a -1.4	-1.2 (13)	1.98	1344
1410	Qz	318 a 335	323 (5)	-0.7 a -0.9	-0.8 (5)	1.32	1672
1510	Qz	313 a 334	323 (2)	-0.8 a 0.8	-0.8 (2)	1.32	1672
1810	Qz	307	307 (1)	-0.3	-0.3 (1)	0.49	1364
1970	Qz	304	304 (4)	-0.3	-0.3 (4)	0.49	1364

Profundidad real	Pozo H16 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
410	Qz	139 a 165	155 (9)	-0.3 a -0.5	-0.4 (9)	0.66	106
510	Qz	141 a 160	153 (12)	-0.6 a -0.6	-0.6 (12)	0.99	94
710	Qz	185 a 252	216 (20)	-0.7 a -0.8	-0.78 (20)	1.28	339
810	Qz	216 a 222	220 (8)	-1	-1 (8)	1.65	369
910	Ca	221 a 260	230 (20)	-0.7 a -1	-0.9	1.48	437
1010	Qz	247 a 250	248 (4)	-1	-1	1.65	557
1110	Qz	251 a 252	251 (3)	-1	-1	1.65	602
1210	Qz	252 a 255	253 (4)	-1.2	-1.2	1.98	602
1310	Qz	298 a 310	306 (15)	-0.2	-0.2	0.33	1367
1410	Ep	308 a 340	326 (13)	-0.2 a -0.3	-0.2 a -0.3	0.41	1809
1510	Qz	289 a 335	310 (6)	-0.4	-0.4	0.66	1463
1610	Ep	328 a 332	329 (10)	-0.1	-0.1	0.16	1948
1710	Qz	333 a 340	338 (9)	-0.1	-0.1	0.16	2092
1810	Qz	290 a 305	303 (25)	-0.1	-0.1	0.16	1276
1910	Qz	330	330 (1)	-0.1	-0.1	0.16	1948

Profundidad real	Pozo H19 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
981	Ca	206 a 268	240 (16)	-0.4 a -1.7	-0.7	1.15	514
1769	Qz	332 a 366	347 (32)	-1.4 a -1.9	-1.6	2.63	2350

Profundidad real	Pozo H17 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
610	Qz	131 a 145	137 (2)	-0.1	-0.1 (2)	0.16	62
810	Qz	134 a 170	145 (16)	-0.2	-0.2 (16)	0.33	82
1010	Qz	168 a 204	191 (15)	-0.3	-0.3 (15)	0.49	218
1110	Qz	185 a 210	200 (5)	-0.2	-0.2	0.33	262
1210	Qz	250 a 270	264 (12)	-0.5	-0.5	0.82	759
1310	Qz	255 a 268	264 (12)	-0.5	-0.5	0.82	759
1410	Qz	273 a 302	288 (10)	-0.6	-0.6	0.99	1020
1470	Ep	277 a 310	304 (24)	-0.3	-0.3	0.49	1364
2010	Ep	319 a 330	321 (5)	-0.2	-0.2	0.33	1688
2110	Ep	324 a 340	328 (5)	-0.1 a -0.7	-0.5	0.82	1801
2230	Ep	325 a 345	331 (15)	-0.6	-0.6	0.99	1927

Profundidad real	Pozo H39 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
602	Qz	161 a 163	162 (5)	-0.3	-0.3 (5)	0.49	120
802	Qz	173	173	-0.3	-0.3 (1)	0.49	163
1002	Qz	240 a 242	241 (6)	-0.3	-0.3 (6)	0.49	516
1100	Qz	266 a 280	270 (40)	-0.6	-0.6 (40)	0.99	819
1200	Qz	323 a 325	324 (10)	-0.8	-0.8 (10)	1.32	1792
1400	Ep	280	280 (1)	-0.3	-0.3	0.49	952
1400	Ca	282	282 (1)	-0.3	-0.3	0.49	952
1800	Ca	310 a 321	218 (50)	-0.5	-0.5 (50)	0.82	341
2000	Ep	324 a 326	325 (10)	-0.4	-0.4 (8)	0.66	1804
2000	Qz	325	325 (5)	-0.4	-0.4 (5)	0.66	1804
2200	Ep	325 a 328	327 (8)	-0.4	-0.4 (8)	0.66	1804
2200	Qz	325 a 326	326 (6)	-0.4	-0.4 (6)	0.66	1804

Profundidad real	Pozo H29 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
410	Qz	127 a 148	134 (22)	-0.8	-0.8 (22)	1.32	62
610	Qz	170 a 240	205 (9)	-0.5	-0.5 (9)	0.82	286
800	Qz	173 a 245	208 (21)	-0.1	-0.1 (21)	0.16	314
1010	Qz	268	268 (4)	-0.5 a -0.6	-0.55 (4)	0.91	759
1100	Ep	288 a 310	304 (6)	-0.5 a -0.6	-0.55 (6)	0.91	1266
1510	Qz	316 a 340	337 (24)	-0.5 a -0.7	-0.6 (24)	0.99	2067
1910	Qz	320 a 345	333 (32)	-0.5	-0.5 (32)	0.82	1931

Profundidad real	Pozo H40 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
402	Ca	137 a 140	138 (8)	1.5	+1.5 (8)	N.C.	
402	Qz	134 a 136	135 (6)	2	+2 (6)	N.C.	
600	Qz	161 a 168	165 (10)	-0.1	-0.1 (10)	0.16	133
801	Qz	202 a 205	203 (10)	-0.1	-0.1 (20)	0.16	262
1201	Qz	302 a 305	304 (25)	-0.4	-0.4 (20)	0.66	1362
1400	Qz	310 a 312	311 (10)	-0.3	-0.3 (11)	0.49	1463
1800	Ca	279 a 294	292 (10)	-0.5	-0.5 (20)	0.82	1098
2100	Qz	287 a 310	310 (22)	-0.8	-0.8 (20)	1.32	1453

Profundidad real	Pozo H41 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
390	Ca	123 a 133	129 (20)	-3.1 a -3.4	-3.1 (20)	5.01	43
540	Ca	145 a 153	151 (12)	-3.0 a -3.2	-3.1 (12)	5.01	92
600	Qz	172 a 192	183 (15)	-8.3 a -8.5	-8.4 (15)	12.17	173
700	Qz	220 a 230	227 (18)	-6.6 a -6.6	-6.6 (18)	9.97	385
900	Qz	293 a 302	297.2 (18)	-5.9 a -6.1	-6.0 (18)	9.19	1102
1000	Qz	307 a 318	314.5 (15)	-6.0 a -6.2	-6.1 (15)	9.32	1353
1100	Ep	320 a 328	325.3 (13)	-5.6 a -5.8	-5.7 (13)	8.78	1671
1180	Qz	330 a 345	338.5 (15)	-5.5 a -5.8	-5.6 (15)	8.65	1911
1400	Qz	320 a 330	326.5 (20)	-4.0 a -4.2	-4.1 (20)	6.52	1707
1600	Qz	340 a 345	341.5 (20)	-5.0 a -5.2	-5.1 (20)	7.92	2043
1700	Qz	342 a 359	352.5 (15)	-6.3 a -6.5	-6.3 (15)	9.58	2310
1800	Qz	355 a 368	363.5 (10)	-6.2 a -6.4	-6.3 (10)	9.58	
1900	Ep	378 a 390	384.5 (12)	-6.9 a -7.1	-7.0 (12)	10.48	

Profundidad real	Pozo H42 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
160	Qz	145 a 150	148 (10)	-0.1 a -1.3	-1.2 (10)	1.98	94
510	Qz	200 a 205	203 (11)	-1.2 a -1.4	-1.3 (11)	2.14	260
610	Qz	215 a 225	221.5 (20)	-7.9 a -8.1	-8.0 (20)	11.7	352
710	Qz	270 a 275	273 (14)	-8.3 a -8.6	-8.5 (14)	12.29	756
810	Qz	295 a 306	298 (28)	-7.8 a -8.2	-8.0 (28)	11.7	1082
920	Ep	300 a 305	301.2 (9)	-8.0 a -8.2	-8.1 (9)	11.82	1160
1010	Ca	294 a 305	300 (28)	-8 a -8.9	-8.7 (28)	12.52	1150
1210	Qz	303 a 310	307 (19)	-7.5 a -7.7	-7.6 (19)	11.22	1241
1510	Ep	325a 335	328.5 (12)	-7.5 a -7.7	-7.6 (12)	11.22	1620
1710	Ep	334 a 345	339 (22)	-7.1 a -7.4	-7.3 (22)	10.85	1981
2110	Ep	374 a 390	384 (17)	-8.9 a -9.2	-9.0 (17)	12.86	
2210	Px	365 a 375	371.6 (6)	-7.9 a -8.2	-8.1 (6)	11.82	

Profundidad real	Pozo H43 Mineral	Rango de Th °C	Promedio Th (n)	Rango de Tf °C	Promedio Tf (n)	Salinidad % en peso eq. NaCl	Profundidad estimada
200	Ca	150 a 162	158 (20)	-4.4 a -4.7	-4.6 (20)	7.25	103
300	Qz	168 a 171	169 (10)	-6.6 a -6.9	-6.8 (10)	10.23	145
400	Qz	190 a 220	212.5 (31)	-7.8 a -8.1	-8.0 (31)	11.7	298
500	Qz	232 a 253	241 (14)	-7.0 a -7.3	-7.2 (14)	10.73	528
605	Qz	236 a 250	244 (18)	-7.5 a -8.1	-7.9 (18)	11.58	525
715	Qz	250 a 260	255 (13)	-7.9 a -8.1	-8.0 (13)	11.7	610
815	Qz	312 a 324	317.5 (15)	-7.0 a -7.2	-7.1 (15)	10.61	1432
905	Ep	325 a 330	327 (8)	-7.3 a -7.5	-7.4 (8)	10.98	1620
995	Ep	334 a 340	336.4 (13)	-7.2 a -7.5	-7.3 (13)	10.85	1854
1055	Ep	349 a 358	355 (14)	-8.1 a -8.4	-8.2 (14)	10.94	2107
1345	Qz	355 a 360	357 (27)	-8.4 a -9.0	-8.9 (27)	12.74	
1405	Qz	375 a 390	383(10)	-8.0 a -9.9	-8.8 (12)	12.63	
1506	Qz	379 a 389	384.5 (29)	-7.9 a -8.3	-8.0 (29)	11.7	
1605	Tr	375 a 385	380 (14)	-8.0 a -8.0	-8.0 (14)	11.7	
1815	Px	328 a 332	381 (4)	-8.0 a -8.0	-8.0 (4)	11.7	

A partir de las mediciones directas de IF en los pozos H-41 (Figura 15), H-42 y H-43 se determinó para el pozo H-41 a 390 m de profundidad una salinidad de 5.1% en peso eq. de NaCl, esta se incrementó a 12.7% en peso eq. de NaCl después de los 600 m y conforme aumenta la profundidad el fluido se mantiene prácticamente isosalino con un valor de $9 \pm 1\%$ en peso eq. de NaCl a excepción de los 1400 m de profundidad en donde la salinidad disminuye hasta 6.54% en peso eq. de NaCl. Se registró un incremento progresivo en las temperaturas de homogenización de 129 °C a 390 m hasta 384.5°C a 1900 m, implicado un gradiente térmico de 169.2°C/Km.

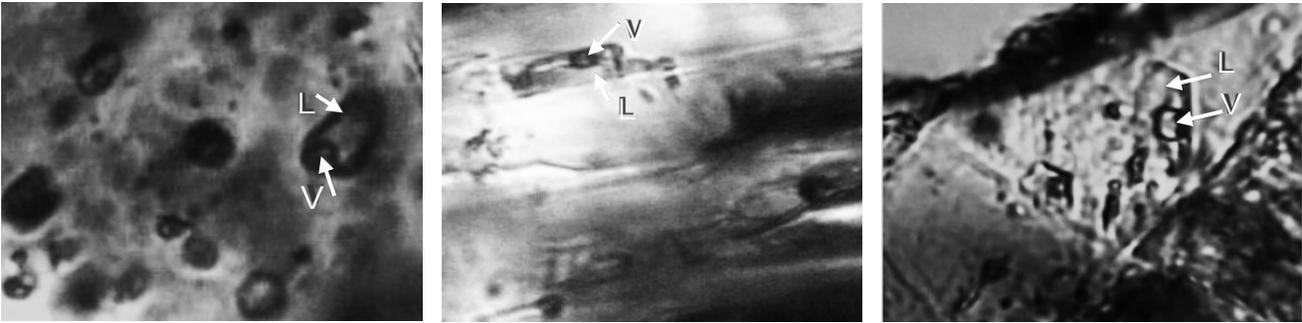


Figura 15. Microfotografía del pozo H-41, se observan diferentes fases de las IF. En la foto de la izquierda la muestra se ubicó a una profundidad de 605 m (L+V), en la foto del centro la muestra pertenece a profundidad de 900 m (L+V), mientras que la foto de la derecha la muestra es de una profundidad de 1000 m (L+V), las tres muestras se encuentran hospedadas en cuarzo.

El pozo H- 42 (Figura 16) presento una salinidad de 1.98 % en peso eq. de NaCl a 160 m de profundidad está incremento a 11.7 % en peso eq. de NaCl a los 610 m; a mayores profundidades se mantiene en una media de 11.8 % en peso eq. de NaCl, siendo este comportamiento muy similar al del pozo H-41. Las temperaturas de homogeneización fueron de 148 °C a 160 m y de 371 °C a 2210 m.

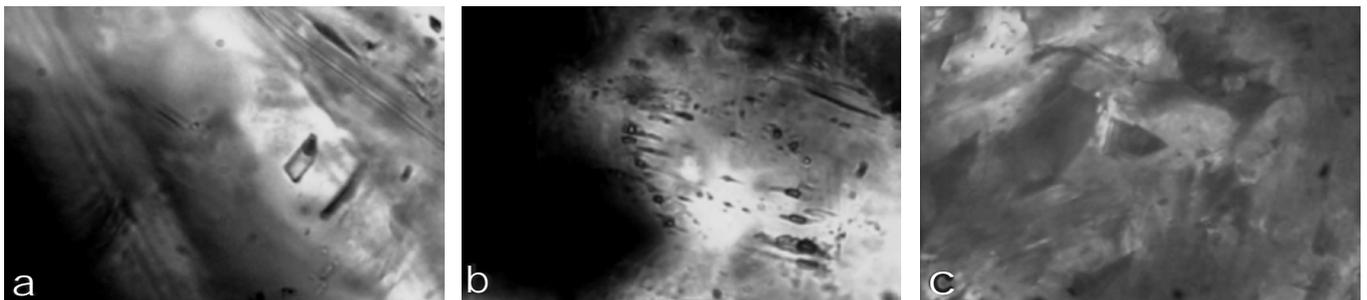


Figura 16. Microfotografía del pozo H-42 donde se observan IF en diferentes minerales huésped: a) IF de fase L+V en calcita a 1010 m de profundidad, b) IF de fase L+V en cuarzo a 810 m de profundidad y c).- IF en epidota a 2110 m de profundidad.

Para el pozo H- 43 (Figura 17) se determinó una salinidad 7.25 % en peso eq. de NaCl a niveles someros y una salinidad promedio de 11.43 % en peso eq. de NaCl a profundidades mayores. La temperatura de homogeneización incrementa de manera progresiva a medida que aumenta la profundidad, de 158 °C a 200 m a 381 °C a los 1815 m, a partir de esta profundidad solo se observaron IF en estado crítico.

Mediante el uso de diagramas bivariantes se inferirá los fenómenos que intervinieron en la modificación de la salmuera, en esto se grafica la temperatura de homogeneización contra la salinidad (Wilkinson, 2012).

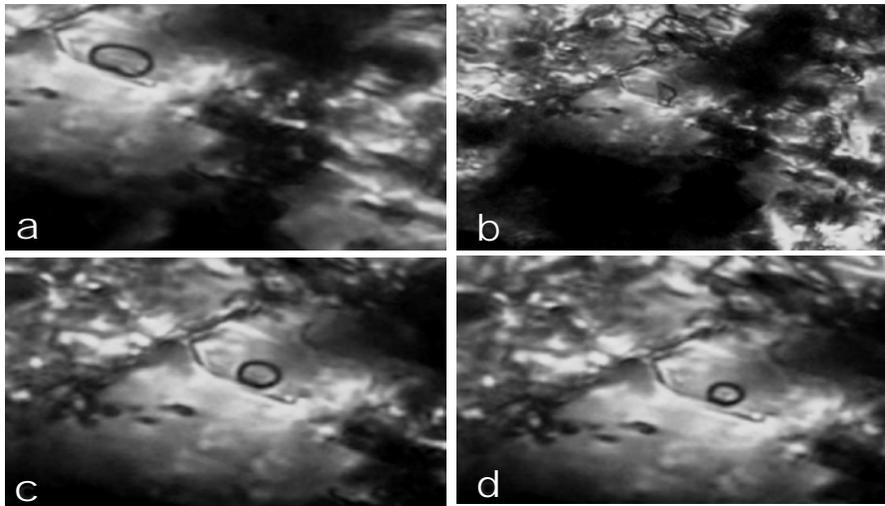


Figura 17. Microfotografía del pozo H-43 a una profundidad de 500 m de la muestra, cuyo mineral huésped es un cuarzo. Se puede observar la secuencia de eventos en función de los cambios de temperatura en una IF que van de: a) IF a 25°C en su estado natural con fases L+V; b) deformación de la fase vapor por los hidratos a - 60°C, con fusión final de hielo a TF = - 7.2°C; c) IF a 200°C nótese disminución de la fase vapor; d) IF a 230 °C casi a punto de homogeneizar en fase líquida la Th final fue de 245 °C.

Con los datos recopilados de estudios previos al presente trabajo y ajustando la salinidad con base al logaritmo presentado por Bakker (2012) se determinó que las inclusiones fluidas presentan en su mayoría fenómenos de ebullición (H-8, H-15, H-17, H-19, H-29, H-39 y H40), a excepción de los pozos H-4 y H-16 que presentan ebullición con un enriquecimiento de salinidad, posteriormente una dilución posiblemente causada por fluidos superficiales (Figura 18).

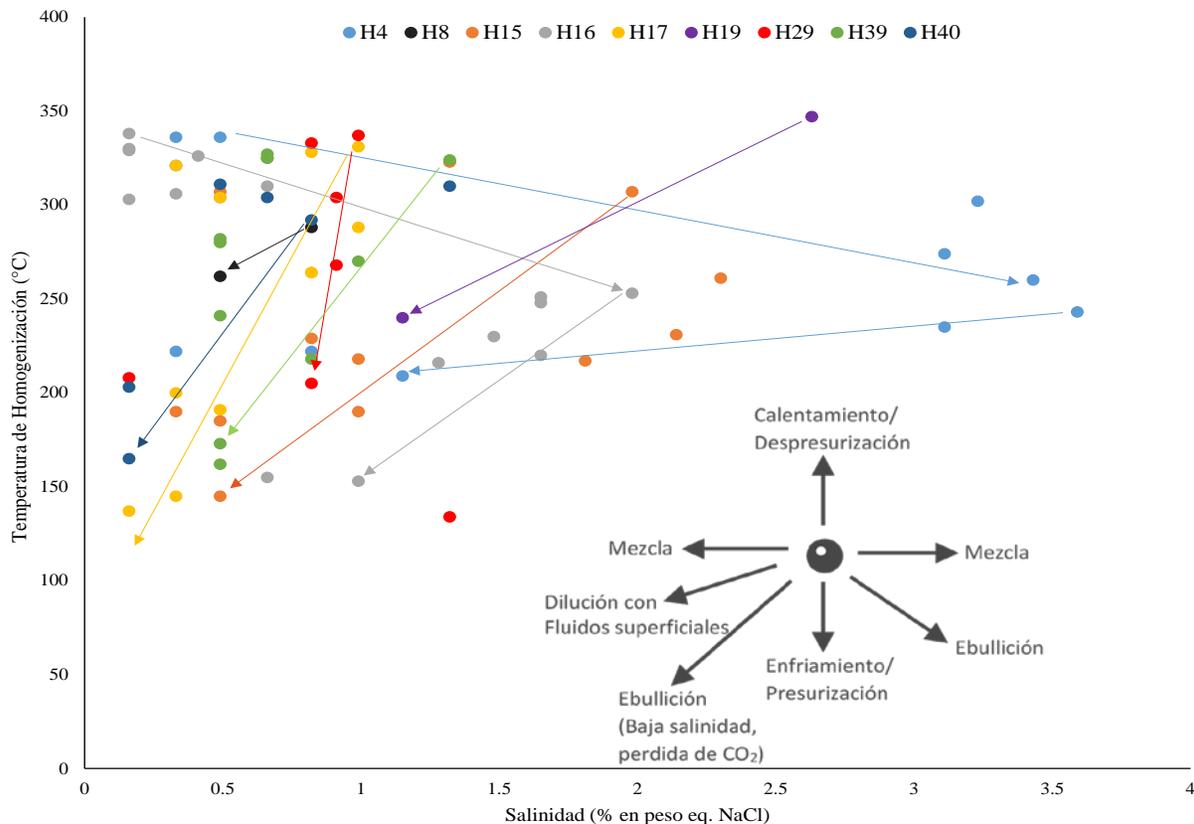


Figura 18. Diagrama bivalente, graficando la temperatura de homogenización vs la salinidad de los pozos H-8, H-15, H-17, H-19, H-29, H-39 y H40.

Del análisis del diagrama bivariable que presenta el pozo H-43 muestra una tendencia inicial a la ebullición para después evolucionar a una dilución con fluidos superficiales someros, para el pozo H-42, se obtuvo

la misma tendencia que el H-43, se determinó que el fluido en ebullición se diluye hacia la superficie, originado por la presencia de aguas meteóricas superficiales, para el pozo H-41 se observa como el fluido aumenta su salinidad a los ± 300 °C, siguiendo una tendencia similar a la de los pozos H-42 y H-43, finalmente a nivel somero se diluye con fluidos superficiales (Figura 19).

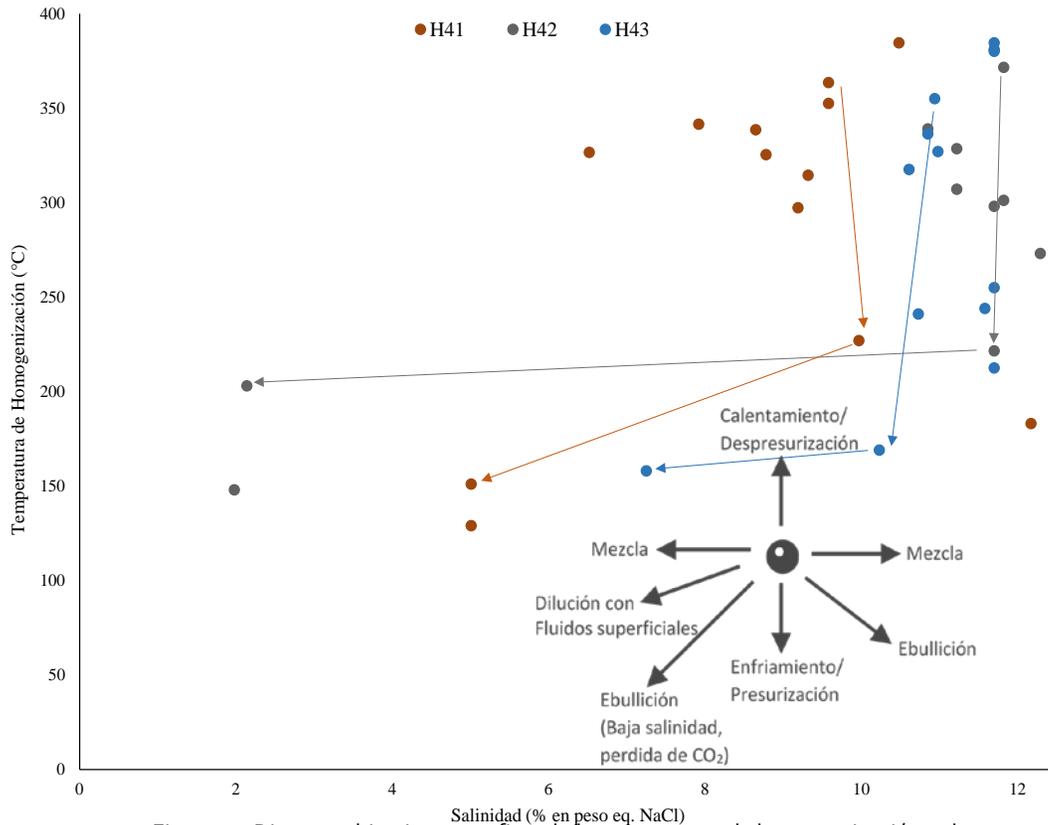


Figura 19. Diagrama bivalente, graficando la temperatura de homogenización vs la salinidad de los pozos H-41, H-42 y H-43

Los pozos mencionados anteriormente están ubicados en la zona productiva sur y son los que presentan mayor salinidad que los pozos de previos estudios (H-4, H-8, H-15, H-16 H-17, H-19, H-29, H-39 y H40), presentan rangos que van de 1.98 a 12.86 % en peso eq. de NaCl. El aumento de salinidad se debe a la presencia de fenómenos de ebullición, generando así la partición de sales dentro de las IF (L+V), y un líquido residual más salino (Wilkinson, 2012).

La ebullición de las IF posiblemente es debido al sistema de fallas que atraviesan los pozos, ocasionando así una despresurización de los fluidos y la ebullición de los mismos cabe mencionar que el pozo H-43 que presento una peculiaridad, IF monofásicas con temperaturas en estado crítico a partir de los 1815 m de profundidad, cabe mencionar que el principal objetivo estructural del pozo fue atravesar un sistema de fallas escalonado constituido por la falla Malpais, Antigua, La Cuesta, un bloque caído al oriente así como el colapso de Los Potreros (Armenta-Flores *et al.*, 2011) esta pérdida sistemática de la presión (pulsos de ebullición) hacia los niveles más someros se ve reflejada por el aumento de la fase de vapor como de

salinidad y una oxidación del sistema en general. Sin embargo este aumento de salinidad no es constante para los pozos H-41 y H-42 a los ± 500 m de profundidad se observa una disminución de salinidad de 7.16 y 9.56 % en peso eq. de NaCl respectivamente; para el pozo H-43 esta disminución en la salinidad se determinó a profundidades más someras ± 200 m, reflejando pérdidas de 3.28 % en peso eq. de NaCl, lo cual concuerda con lo obtenido mediante el diagrama bivalente th vs salinidad en donde es causado por una dilución por fluidos superficiales de baja salinidad que se encuentran en niveles somero.

Se realizó un diagrama binario con base en los cálculos obtenidos por Cruz-Pérez *et al.*, (2016), del modelo de salinidad variable por ebullición de los sistemas hidrotermales activos y fósiles, a partir de estos datos se graficaron las profundidades reales de los diferentes pozo del CGH vs las profundidades estimadas con base a la salinidad y la temperatura.

El modelo de salinidad variable por ebullición considera dos aspectos de relevancia: 1) el aumento de salinidad debido a la pérdida de vapor durante la ebullición y 2) el efecto de burbujas de vapor en la presión hidrostática, efecto que no había sido considerado en los anteriores modelos (Haas, 1971; Canet *et al.*, 2011), mejorando así los resultados. La aplicación de este modelo en el sistema hidrotermal vivo como es el caso del CGH proporciona profundidades estimadas que teóricamente deberían alcanzar una precisión del 99%, a excepción de zonas donde existen grandes concentraciones de CO₂ en donde se obtendría un error del 30%. La presencia de CO₂ en los fluidos geotérmicos provoca el aumento de la presión de vapor a lo largo de la curva liquido-gas, reduciendo así la temperatura de punto de ebullición (Hedenquist y Henley, 1985), ocasionando que el punto de ebullición de las IF se lleve a cabo a mayor profundidad que en ausencia de este gas.

Teóricamente si existe una constata ebullición y aumento de salinidad por la pérdida de vapor en un sistema geotérmico, esto bajo condiciones de nula o baja concentración de CO₂, se obtendría al graficar las profundidades estimadas vs las profundidades reales un comportamiento de la gráfica de la siguiente forma:

$$Y = mX + C \quad (5)$$

Donde **Y** (profundidad estimada) es una función lineal de **X** (profundidad real) y **m** es la pendiente cuya relación es igual a **1**, y **C** puede ser interpretado como el punto donde la recta se intersecta con el eje **Y**, es decir el valor de **Y** cuando **X=0**, cuyo valor teórico sería siempre **0**. De esta forma cualquier variación en la salinidad con respecto a la temperatura durante la evolución del fluido por ebullición afectara la profundidad estimada, lo cual nos indicaría dos fenómenos: 1) ebullición intensa o mezcla isotérmica con fluidos más salados, fenómeno que se vería reflejado cuando la recta presentara una pendiente con mayor inclinación con respecto a las medidas anteriores, y 2) el fenómeno detectable es una mezcla

isotérmica con fluidos menos salados o dilución con fluidos superficiales menos salados, lo que provocaría que la recta presente una pendiente negativa con respecto a las medida anteriores.

Es importante mencionar que debido a los márgenes de error del modelo en ebullición de salinidad (Cruz-Pérez *et al.*, 2016) que va de 1 a 30 %, las rectas formada entre mediciones presentaran una variación considerable, y solo en las pendiente muy prolongadas que salgan completamente de la tendencia se puede considerar la existencia de un fenómeno que pudiera modificar la salmuera.

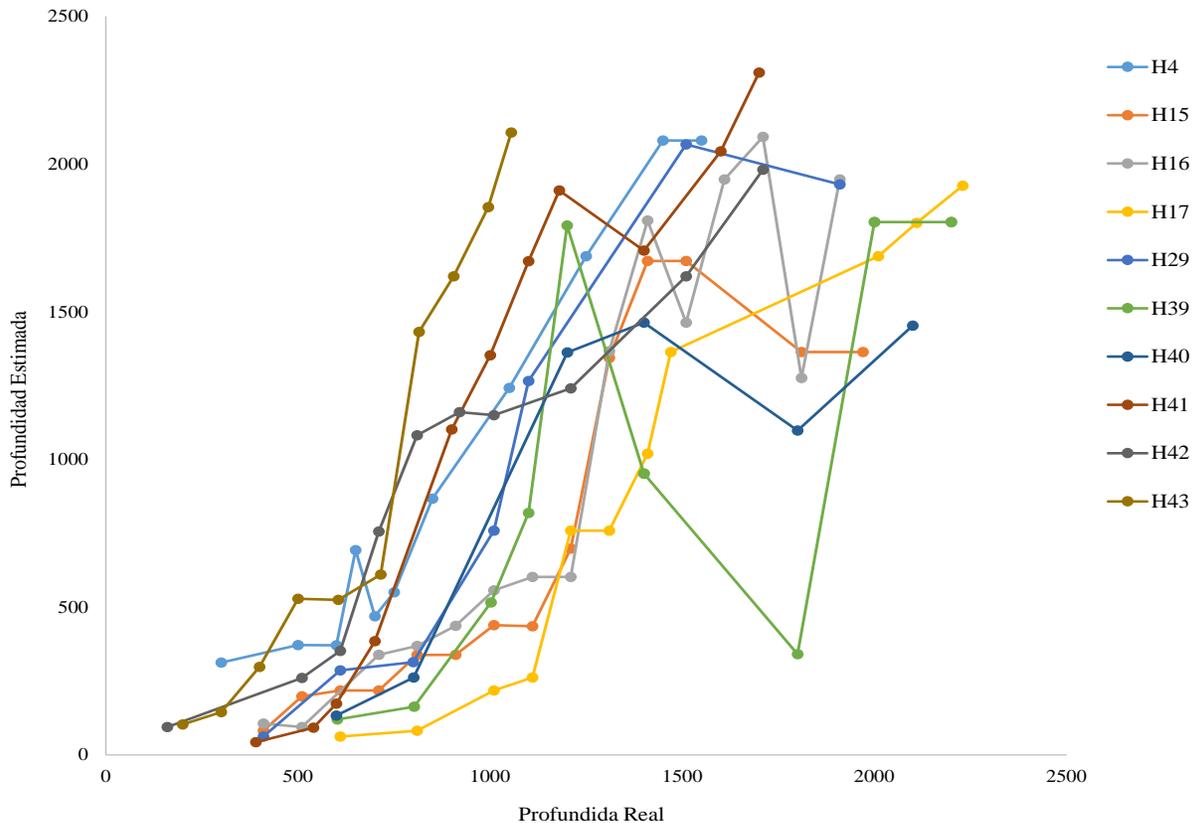


Figura 20. Diagrama bivariante, graficando la profundidad estimada vs la profundidad real de los pozos H-4, H-15, H-16, H-17, H-29, H-39, H-40, H-41, H-42 y H-43.

En el diagrama bivariante en donde se grafica la profundidad estimada vs la profundidad real (Figura 20) se pueden apreciar dos tendencias, la primera se visualiza de manera muy tenue en los pozos H-16, H-29, H-15 y H-43, que corresponde a un aumento de pendiente la cual se aprecia principalmente en el pozo H-4; este aumento de pendiente se da a partir de los 500 m de profundidad hasta los 700 m, el aumento de profundidad puede estar relacionado con una intensa ebullición lo que se ve reflejado en un aumento de salinidad y por consecuencia de profundidad estimada. La segunda tendencia y más perceptible que la anterior es una disminución de profundidad estimada de los pozos H-15, H-16, H-29, H-39, H-40 y H-41, está pendiente negativa comienza de los 1180 a los 1810 m de profundidad, el fenómeno observado en estos pozos puede corresponder a la dilución con una mezcla de agua más fría; sin embargo una ebullición con pérdida de CO₂ puede provocar un decremento en la salinidad aparente, dichos

fenómenos fueron anteriormente visualizados por Prol-Ledezma (1998). Estos fenómenos se correlacionan con los diagramas de t_h vs salinidad (Wilkinson, 2012) presentados en las Figuras 18 y 19, donde se observa fenómenos de ebullición y dilución, los cuales proporcionan robustez a los resultados obtenidos en el diagrama propuesto en el presente trabajo (Figura 20). Determinar las zonas de ebullición en el sistema geotérmicos de Los Humeros es relevante ya que generan grandes proporciones de líquido a vapor y altas entalpías de descarga (Scott *et al.*, 2014). Dichas zonas fueron indicadas por Barragán *et al.*, (1991), y confirmadas mediante este estudio.

VII.1.1 Evolución Térmica de los Fluidos

Para comprender la evolución térmica de los fluidos en el CGH, se realizó una comparación de las temperaturas estabilizadas en pozo por el Método Horner (Horner, 1951), y las temperaturas de homogenización (T_h °C) promedio obtenidas de las IF, los resultados obtenidos se presentan gráficamente en las Figuras 21 y 22 mediante dos secciones N-S y W-E respectivamente, las cuales atraviesan las zonas productivas del CGH.

La Figura 21 presenta las isotermas de los valores promedio de las T_h obtenidos de las IF (líneas azules a 150, 190, 230, 270, 310 y 370 °C) en una sección longitudinal N-S, donde se observan fluctuaciones de temperatura en los fluidos con respecto a la superficie; siendo estas ocasionadas principalmente por los sistema de fallas que atraviesan los pozos por ejemplo: el sistema de fallas que atraviesan los pozos H-39, H-42, H-43 este último presenta mayor movilidad de fluidos calientes con respecto a la superficie, los cuales pasan de 158 °C a los 200 m de profundidad aumentando hasta 384.5 °C a los 1500 m, lo que indica un gradiente geotérmico de 174.23 °C/km en esta zona.

Para la Figura 22, las isotermas obtenidas por las IF (líneas azules a 190, 230, 270 y 310 °C) de la sección longitudinal W-E, muestra que las fluctuaciones de calor son de menor grado, debido principalmente a falta de datos en cuanto a T_h de IF, sin embargo se aprecia que la parte oeste de la sección es la zona en donde se alcanzan mayores temperaturas a profundidades someras, mientras que las temperaturas van disminuyendo conforme nos alejamos hacia el este, comportamiento observado tanto en la temperaturas obtenidas en IF como en las temperaturas estabilizadas en pozo (líneas rojas a 190, 230, 270 y 310 °C).

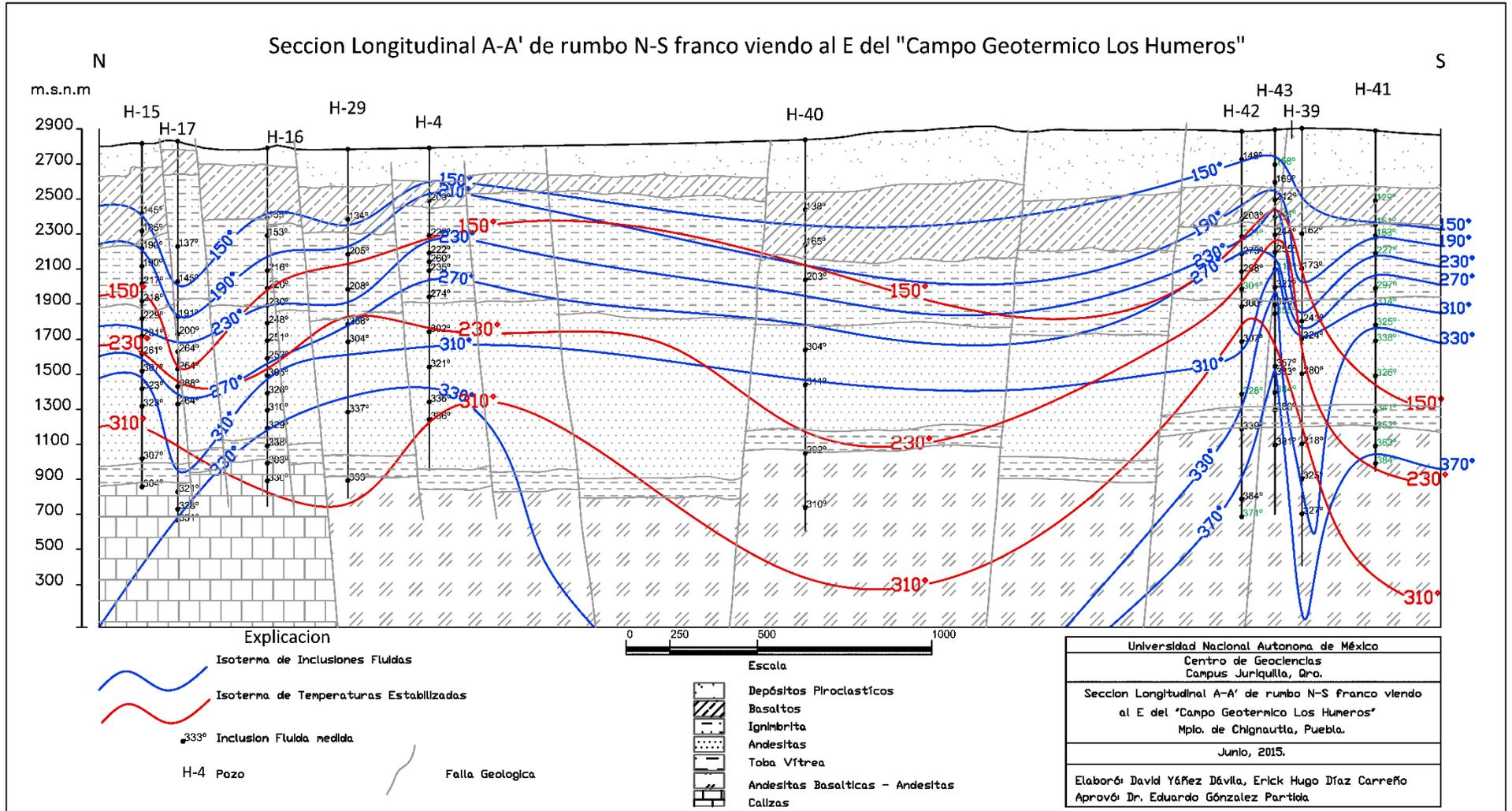


Figura 21. Isothermas de IF y Temperaturas Estabilizadas de la sección longitudinal A-A' de N-S del CGH.

Las temperaturas estabilizadas (líneas rojas a 150, 230 y 310 °C en la sección N-S y 190, 230, 270 y 310 °C) en la sección W-E están por debajo de las temperaturas de homogenización (líneas azules) sugiriendo que el reservorio del CGH se encuentra en enfriamiento ya que el fenómeno inverso implicaría un sistema en calentamiento o que las temperaturas estabilizadas estén ligeramente subestimadas, esto último es muy probable ya que aún no existe un método para estimar las temperaturas estabilizadas correctamente (Espinoza O., 2007).

Los resultados obtenidos en la sección N-S, son contrarios a los expuestos por Tinoco (2008), donde concluyó que el reservorio del CGH se encontraba en calentamiento por el hecho de que las isotermas obtenidas de las temperaturas estabilizadas estaban por encima de las isotermas de las IF. Esta diferencia de resultados se debe a que las temperaturas estabilizadas se pueden obtener generalmente por tres métodos diferentes: 1) Método Horner (MH) propuesto por Horner (1951), 2) Método Esférico radial (MER) propuesto por Ascencio *et al.*, (1994) y 3) Método Cilíndrico (MC) propuesto por Hasan y Kabir (1994), sin embargo en el área de estudio han sido empleados solo los dos primeros métodos (MH y MER) cuya diferencia entre ambos métodos radica en que el MER considera que en la zona perturbada por el pozo la roca es infinita, homogénea e isotrópica con propiedades termofísicas constantes y despreja la convección en el pozo, siendo estas condiciones en la naturaleza imposibles de alcanzar, mientras que el método Horner se basa en un constante e infinita fuente de calor en una sección transversal que representa la perforación a pozo cerrado (sin circulación), donde las variables de la ecuación son la temperatura del pozo, el tiempo, el radio del pozo y la difusividad térmica de la formación (Andaverde *et al.*, 2004).

Las diferencias entre los métodos para la obtención de temperaturas estabilizadas en pozos geotérmicos, fue prevista y evaluada bajo métodos estadísticos y modelos de regresión por Andaverde *et al.*, (2004), donde con base en los resultados el Método Esférico Radial (MER), sobreestima las temperaturas hasta en un 10%, por lo que no es recomendable para la aplicación en sistemas geotérmicos, mientras que los métodos Horner y Cilíndrico proporcionan temperaturas más cercanas a las reales. Por lo anteriormente expuesto, para este trabajo se decidió utilizar el método Horner (MH) para obtener las temperaturas estabilizadas, por lo tanto los resultados obtenidos a partir de este son significativamente diferentes al resto de los trabajos ya publicados.

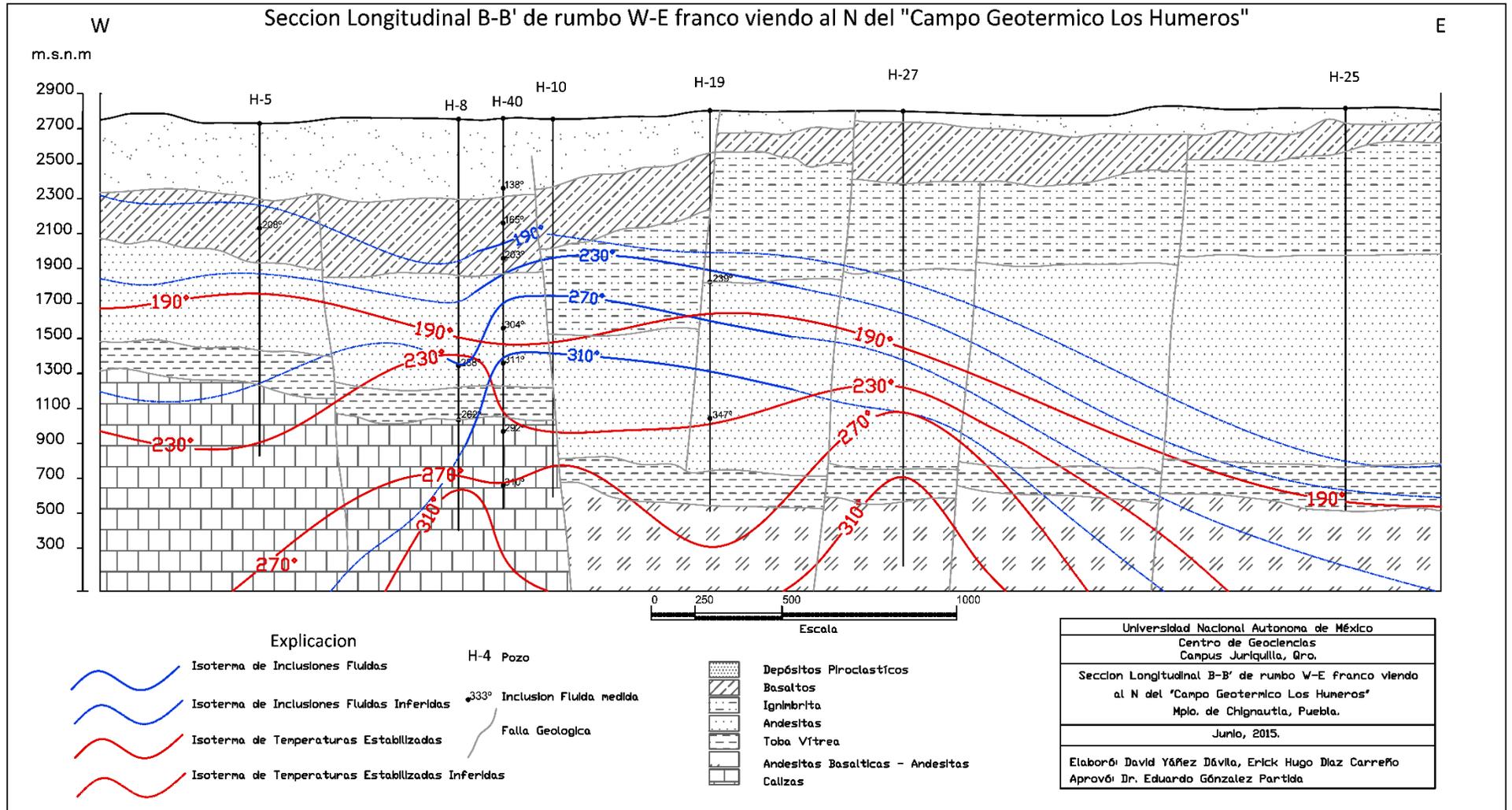


Figura 22. Isothermas de IF y Temperaturas Estabilizadas de la sección longitudinal B-B' de W-E del CGH.

VII.II Petrografía y Minerografía

Las descripciones petrográficas y minerográficas se realizaron con la finalidad de distinguir las principales fases minerales primarias y de alteración hidrotermal, aspectos texturales, abundancia y grado de alteración hidrotermal, usando 16 secciones delgadas y briquetas pulidas. Se sintetizó la información petrográfica y minerográfica de cada una de las muestras (Tabla 5), correspondientes a los diferentes pozos, las fichas del análisis se pueden observar en el **Anexo II**. Cabe mencionar que la nomenclatura de las muestras no corresponde directamente al pozo en estudio, en la Tabla 4 cuenta con la correcta correspondencia tanto en el pozo en estudio como en la profundidad de la muestra.

Tabla 4. Numero de pozo y profundidad de las muestras analizadas mediante petrografía y minerografía.

Muestra	GH-01	GH-02	GH-03	GH-04	GH-05	GH-06	GH-07	GH-08	GH-09	GH-10	GH-11	GH-12	GH-13	GH-14	GH-15	GH-16
Pozo Geotérmico	H-5	H-23	H-23	H-23	H-25	H-25	H-38	H-38	H-38	H-38	H-39	H-39	H-39	H-39	H-40	H-40
Profundidad (m)	325	1201	1925	2496	1710	2300	1103	1500	1953	1803	1200	1650	1800	2100	1612	2100

Tabla 5. Síntesis del análisis petrográfico y minerográficos de diversas muestras del CGLH.

Muestra	Tipo de roca	Análisis Petrográfico - Mineralográfico										Minerales Producto de Alteración Hidrotermal						
		Matriz										Petrografía			Minerografía			
		Cpx	Opx	Plg	Felk	Frag-rx	Bt	Ilm	Mag	Vidrio	Microlito	Cc	Qz	Ser	Clo	Ep	Hm	Py
GH-01	Toba cristalina	x	x	x			x				x	x	x			x	x	
GH-02	Andesita	x		x	x		x	x	x	x		x	x				x	
GH-03	Andesita		x	x			x	x	x	x		x	x			x	x	x
GH-04	Andesita		x	x	x					x		x	x			x	x	x
GH-05	Andesita - Basalto	x	x	x			x	x			x					x		x
GH-06	Andesita	x	x	x			x				x	x				x	x	x
GH-07	Andesita			x						x		x				x	x	x
GH-08	Andesita	x	x	x						x		x				x	x	x
GH-9	Toba lítica	x	x				x	x		x		x	x			x	x	x
GH-10	Andesita	x		x			x			x		x	x			x	x	x
GH-11	Andesita	x	x	x						x		x	x			x		x
GH-12	Andesita			x						x		x				x	x	
GH-13	Andesita		x	x								x	x	x	x	x	x	x
GH-14	Andesita			x						x		x				x	x	x
GH-15	Toba vítrea			x			x			x		x				x	x	x
GH-16	Basalto			x						x		x				x	x	x

Las fases más abundantes de minerales transparentes son las plagioclasas con una abundancia relativa entre el 50 y 70 %, presentándose como fenocristales euhedrales a subeuhedrales con tamaños que varían de 100 – 1000 micras (μ), comúnmente las plagioclasas exhiben maclado tipo albita y carlsbad con fracturas y bordes corroídos debido principalmente a la alteración hidrotermal a la que son expuestas, presentando en muchos casos reemplazamiento de epidota, se presentan también clinopiroxenos

(augita) y ortopiroxenos (enstatita) y en menor grado feldespato alcalino. Las muestras presentan tres texturas generales porfídicas, microlíticas y afaníticas (Figuras 23-A,B,E,F;24-A,B,E,F;25-A,B,E,F y 26-A,B,E,F).

Las fases de minerales opacos primarios solo se observan ilmenita y magnetita mientras que los minerales neoformados como la hematita y pirita son más abundantes que los anteriores. En cuanto a la mineralogía de alteración hidrotermal está constituida principalmente por epidota y en menor grado calcita, cuarzo, sericita y clorita, formando cristales de anhedrales a subeuhedrales (Figuras 23-C,D,G,H;24-C,D,G,H ;25-C,D,G,H y 26-C,D,G,H)..

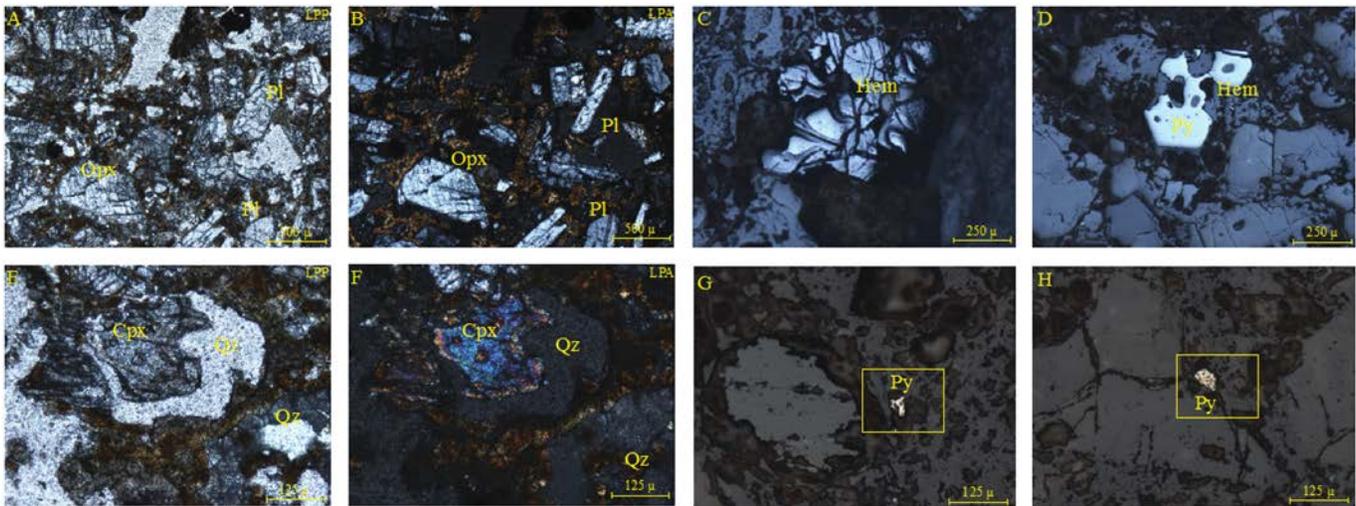


Figura 23. Microfotografías de la muestra GH-1 (toba cristalina) perteneciente al pozo H-5 a 325 m de profundidad. A y E en luz transmitida (LPP) y B, F en niculos cruzados (LPA) las muestras presentan textura microlítica ofítica, con presencia de cristales subeuhedrales a anhedrales de plagioclasas (Pl), ortopiroxenos (Cpx) y clinopiroxenos (Cpx), el cuarzo se presenta rellenando cavidades. En C, D, de briquetas pulidas se observa la presencia abundante de hematita y en G y H pirita en proporciones mucho menor. La alteración presente es de tipo sericítica observable en las muestras B y F.

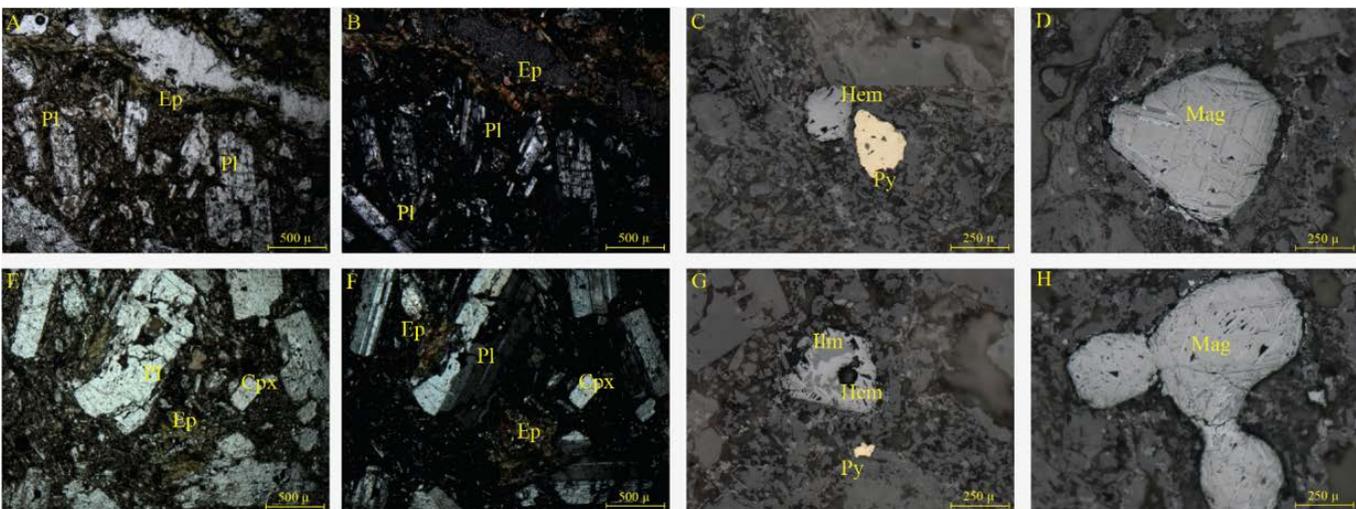


Figura 24. Microfotografías de la muestra GH-6 (andesita) perteneciente al pozo H-25 a 2300 m de profundidad. A y E en LPP, B y F en LPA presentan textura microlítica ofítica con presencia de cristales subeuhedrales de plagioclasas con bordes corroídos y parcialmente alterados a epidota, en E y F existe también la presencia de clinopiroxeno. En C y G se observa la presencia de minerales neoformados de hm y py, mientras que las muestras D y H solo se observa magnetita.

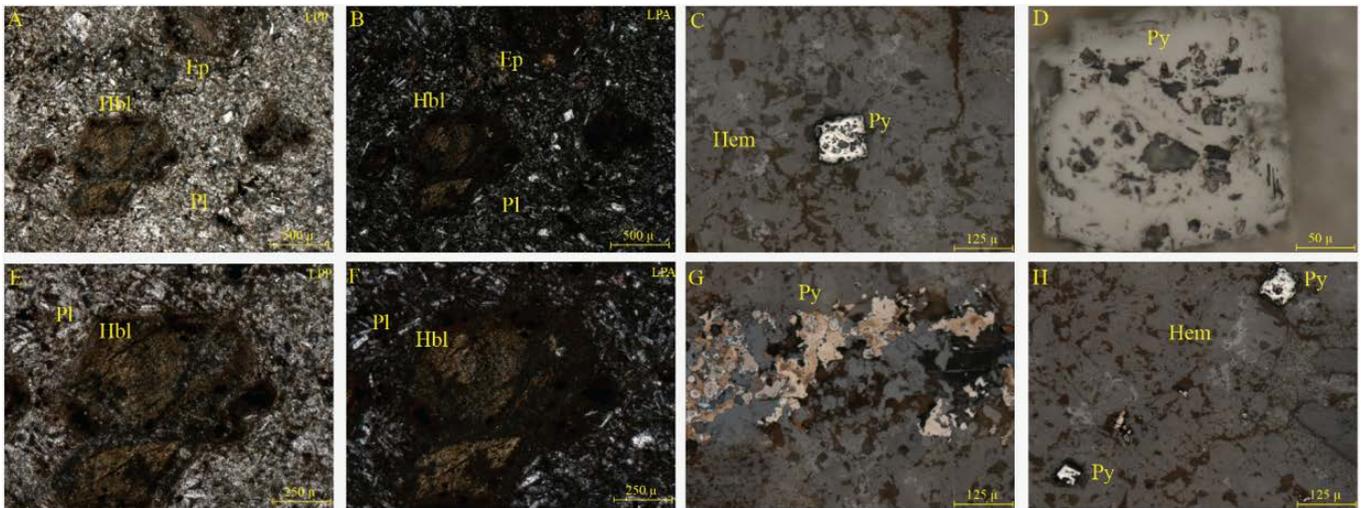


Figura 25. Microfotografías de la muestra GH-13 (andesita) perteneciente al pozo H-39 a 1800 m de profundidad. A y E en LLP presentan fenocristales de horblenda (hbl) alterada, con una matriz microlítica de plagioclasas con reemplazamiento de epidota en B y F en LPA. En C, D, G y H se observa pirita y hematita como minerales neoformados, presentando una zona con oxidación moderada.

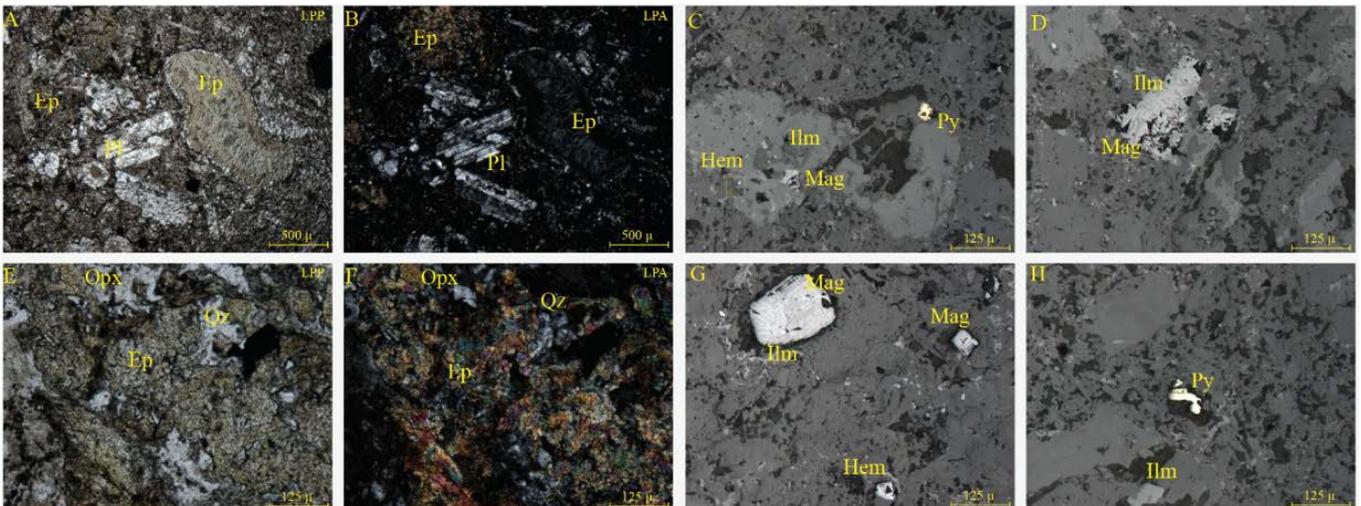


Figura 26. Microfotografías de la muestra GH-4 (andesita) perteneciente al pozo H-23 a 2496 m de profundidad. A y E en LPP, B y F en LPA presentan textura porfídica, con cristales subhedrales fracturados de plagioclasas en A y B donde la epidota (Ep) se encuentra reemplazando la Pl, mientras que E y F presentan abundante epidota y cuarzo rellenando cavidades. En C, D, G y H se presenta minerales opacos mayormente de ilmenita seguido de magnetita con minerales neoformados de hematita y pirita. La alteración presente es de tipo propilítica (Ep)

En el CGH la paragénesis mineral de alteración hidrotermal depende en gran parte de la temperatura (Figura 27), la cual se encuentran emplazados generalmente en fracturas y/o microfracturas y en vuggs, fenómenos previamente visualizados por Martínez-Serrano & Alibert, (1994) y Prol-Ledesma, (1998).

Con base en los datos anteriormente publicados (Viggiano & Robles, 1988a; Prol-Ledesma, 1991; Izquierdo 1993; Martínez-Serrano & Alibert, 1994; Prol-Ledesma, 1998; Tinoco, 2008) y los datos adquiridos en el presente estudio, los minerales de alteración están distribuida de la siguiente manera: La zona I o zona argílica (<600 m) con la presencia de zeolitas, calcita y óxidos. La zona II es de tipo propilítica (600 – 1700 m) con presencia de epidota, clorita, calcita, cuarzo y sulfuros. La zona III (>1815 m) está presente solo en ciertos sectores del campo geotérmico como es el caso del pozo H-43 donde las

temperaturas superan los 350°C, en este se presentan minerales de alteración como la pirofilita, sericita, anhidrita, biotita y pirrotita. Finalmente en la zona IV y más profunda (>1700 m) con la presencia de calcita, diopsida, wollastonita, calcopirita, etc. La pirita es el mineral más abundante a través de la secuencia volcánica alterada.

La depositación de minerales hidrotermales ocurre principalmente en la Unidad III descrita en la geología local como productos de vulcanismo pre-calderico, lo que indica una fuerte interacción agua-roca. Las unidades I y II también han sido alteradas, pero debido a su baja permeabilidad (Viggiano y Gutiérrez, 1988a), la intensidad de alteración hidrotermal es escasa y actuando más como rocas relativamente impermeables. Las rocas encontradas en la Unidad II (600 – 1 200 m) actúan como la capa sello del reservorio más profundo, el cual se encuentra localizado en la Unidad III.

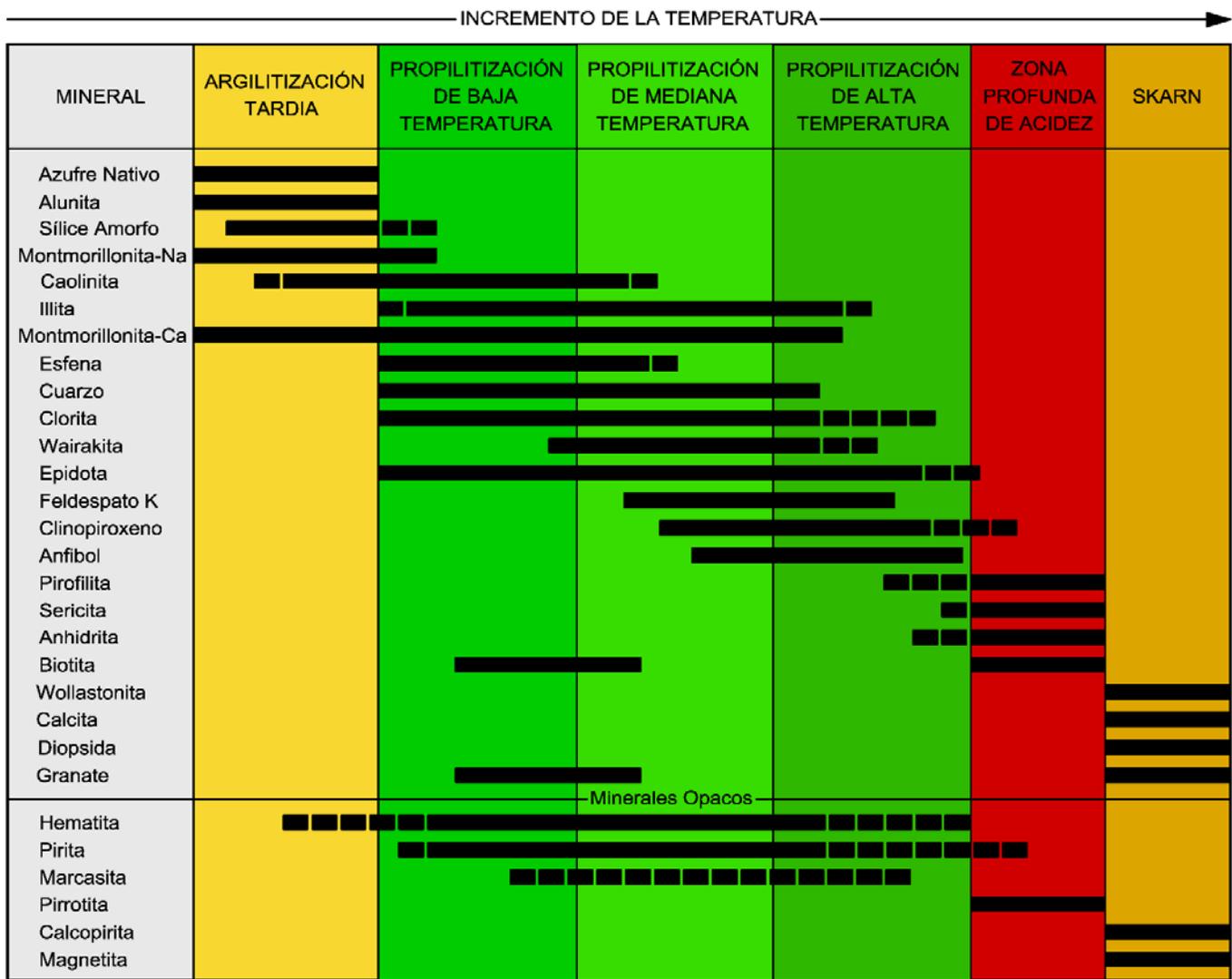


Figura 27. Zonamiento mineralógico de minerales de alteración transparentes y opacos del CGH. Modificado de Viggiano y Robles (1988a), Prol-Ledesma y Browne (1989), Prol-Ledesma (1991), Izquierdo (1993), Martínez-Serrano y Alibert (1994), Prol-Ledesma (1998) y Tinoco (2008).

VII.III Caracterización de la Alteración Hidrotermal Superficial

La caracterización cualitativa de la mineralogía de alteración hidrotermal superficial del CGH, se llevó a cabo a partir de las técnicas de difracción de rayos x (DRX) y espectroscopia de reflectancia de onda corta (SWIR), el uso de ambas técnicas complementan los resultados, debido a que la técnica de SWIR no identifica minerales que carezcan de enlaces OH, H₂O, SO₄, etc., como el cuarzo, cristobalita, hematita, albita, etc., los cuales son identificables por la técnica de DRX. Los resultados de las 12 muestras especiales de rocas alteradas obtenidas mediante SWIR y DRX se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6. Composición mineralógica obtenida por espectroscopia de reflectancia de onda corta (SWIR) y difracción de rayos X (DRX).

Muestra	Relacion Litologica - Estructural	Estilo y Grado de Alteración	Minerales Identificados		Tipo de Alteración
			SWIR	DRX	
EG-01	Basalto Alterado	Alteración pervasiva de intensidad debil	Sme, Kao	Kao, Mont, Qz	Argílica Avanzada
EG-02	Basalto Alterado	Alteración pervasiva de intensidad moderada	Sme	Qz, Mont, Kao, Crt	Argílica Avanzada
EG-03	Fuente activa	Alteracion pervasiva de intensidad fuerte	Sme, Op	Qz, Mont,	Argílica
EG-04	Falla Las Habas	Alteración pervasiva de intensidad moderada	Sme	Qz, Cc	Argílica
EG-05	Fuente activa	Alteracion pervasiva de intensidad fuerte	Sme	Qz, Kao	Argílica
EG-06	Fallas Arroyo Grande	Alteración no pervasiva de intensidad moderada	Sme, Op	Qz, Cc	Argílica
EG-07	Falla Xalapazco	Alteración pervasiva de intensidad debil	Sme, Dick	Crt, Hma, Alb	Silícica
EG-08	Falla Xalapazco	Alteración pervasiva de intensidad debil	Sme, Op	Qz, Gy	Argílica
EG-09	Fallas Arroyo Grande	Alteración pervasiva de intensidad moderada	Sme, Dick	Gy, Jrs	Argílica avanzada - acido-sulfato (Jarosita)
EG-10	Falla Humeros	Alteración selectiva con control estructural	Sme, Dick	Qz, Alu	Argílica avanzada - acido-sulfato (alunita)
EG-11	Falla Humeros	Alteración selectiva con control estructural	Dick, Op	Qz, Cc	Silícica
EG-12	Fuente activa	Alteracion pervasiva de intensidad fuerte	Sme, Op	Qz, Alu	Argílica avanzada - acido-sulfato (alunita)

VII.III.I Difracción de Rayos X (DXR)

Los minerales identificados mediante DRX, que son el resultado de los procesos de interacción agua-roca llevados a cabo en la superficie del CGH fueron los siguientes: caolinita, montmorillonita, cuarzo, cristobalita, calcita, hematita, albita, alunita, jarosita y yeso (Figura 28). Las asociaciones hidrotermales presentaron preferencia a una determinada litología, en el caso de la caolinita ± montmorillonita ± cuarzo se presentó en los basaltos, la alunita ± cuarzo se presentó solo en las andesitas, el cuarzo se hizo presente en las diferentes litologías principalmente en rocas que presentaban alteración pervasiva, la calcita ± cuarzo se presentó principalmente en tobas.

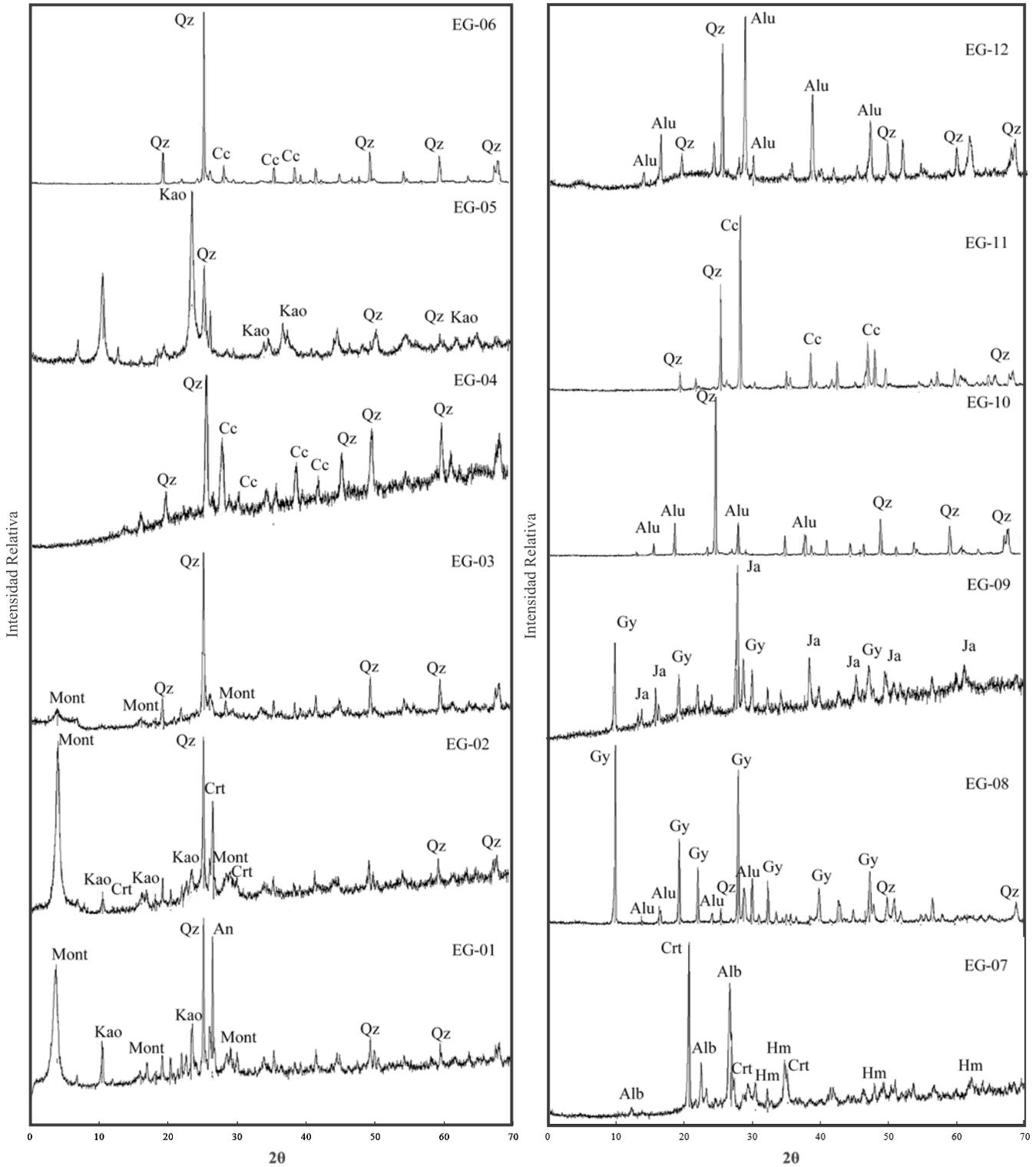


Figura 28. Espectros de los principales minerales de alteración obtenidos por DRX de las 12 muestras especiales de rocas alteradas del CGLH. Montmorillonita (Mont), caolinita (kao), cuarzo (Qz), calcita (Cc), yeso (Gy), alunita (Alu), cristobalita (Crt), jarosita (Ja), hematita (Hm) y fases minerales como plagioclasas; albita (Alb) y anortita (An).

VII.III.II Espectroscopia de Reflectancia de Onda Corta (SWIR)

De resultados obtenidos por el SWIR se determinó principalmente la presencia de esmectita en 11 de las 12 muestras especiales de roca alteradas (Figura 30), el ópalo se detectó principalmente en rocas que mostraron alteración pervasiva (alteración argílica – silícica), la caolinita predominó en basaltos y finalmente la dickita se presentó en basaltos, andesitas y tobas. Estos resultados son congruentes con lo obtenido mediante DRX, por lo que se infiere que la alteración hidrotermal a la que están sometidas dichas rocas varía de argílica, silícica, argílica avanzada y argílica avanzada - ácido-sulfato ya sea con la presencia de alunita o jarosita según sea el caso, como producto de la alteración de fases minerales primarias (plagioclasas, piroxenos, feldespatos, magnetita, vidrio volcánico, etc.) con aguas ácido sulfatadas, produciendo ensambles de minerales secundarios predominantemente por sílice amorfa, sulfatos de Ca/Fe/Al, filosilicatos (grupo de la caolinita y esmectitas) y óxidos (hidróxidos) de Fe.

Los resultados obtenidos mediante SWIR (Figura 29) reflejan una mezcla de fases debido a la gran cantidad de curvas presentes en el espectro, pertenecientes a diferentes grupos funcionales. Se identificó el grupo OH el cual está relacionado a las arcillas, específicamente el OH-Al con lo que se determinó que se trata de caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) la cual se presentó en una sola muestra (EG-01) cuyo espectro característico presenta dos absorciones dobles, una en un rango de 2176 y 2215 nm y la segunda en 1434 y 1483 nm, la primera absorción corresponde a enlace Al-OH y la segunda a la vibración de H_2O molecular; la presencia de caolinita se confirmó mediante DRX. Por otro lado se encontró el grupo Si-O perteneciente a los silicatos en este caso se trata del ópalo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) este presenta dos absorciones pronunciadas asimétricas con mínimos de reflectancia, con un primer rango de 1905 a 1927 nm y el segundo de 1410 a 1448 nm, que corresponden a agua molecular y agua ligada respectivamente (Canet *et al.*, 2015) cuya presencia de ópalo fue confirmada por DRX con asociación de cuarzo y cristobalita (Tabla 6). Un mineral de alteración presente en 11 de las 12 muestras es la esmectita, cuyo espectro produce una absorción característica en 1410 nm y una reflectancia mínima a los 2210 a 2218 nm el cual corresponde a enlaces Al-OH otra absorción característica de esta ocurre a 1910 nm esto debido al agua molecular y otra menos pronunciada y solo vista en algunas muestras a 2350 nm por enlaces Mg-OH, la presencia de esmectita se confirma por la presencia de montmorillonita, dickita y caolinita obtenida mediante DRX (Canet *et al.*, 2015).

Con los resultados obtenidos mediante DRX y SWIR se realizó la clasificación de la alteración hidrotermal en base a las asociaciones minerales presentes en argílica, argílica avanzada, silícica y argílica avanzada – ácido-sulfato ya sea con presencia de jarosita o alunita (Tabla 6). La alteración silícica está representada

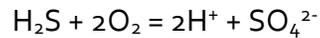
por cristobalita y ópalo, los cuales fueron identificados mediante DRX y SWIR respectivamente. Esta asociación indica temperaturas debajo de 150° C y condiciones de pH cercano al neutral (Henley y Ellis, 1983; White y Hedenquist, 1995). La alteración argílica avanzada está representada por asociaciones de caolinita, dickita, alunita, este tipo de asociación comúnmente es encontrada en depósitos epitermales de alta sulfuración; sin embargo en depósitos epitermales de baja sulfuración y sistemas geotérmicos esta se presenta asociada también a cristobalita, jarosita y ópalo ocasionada por una sobreimpresión debido al calentamiento de vapor por encima de la capa freática, asociado a la disolución y oxidación de H₂S en el condensado de vapor o agua superficial, bajo condiciones de pH ácido (2-3) y temperaturas alrededor de 100°C (White & Hedenquist, 1995; González-Partida *et al.*, 2005). La afluencia de gas H₂S (H₂S + 2O₂ =H₂SO₄) derivado del vapor, produce a su vez aguas acidas sulfatadas (Carson, 2015).

Tabla 7. Ocurrencia de los principales minerales de alteración del CGLH en base a los obtenidos por espectroscopia de reflectancia de onda corta (SWIR) y difracción de rayos X (DRX).

Mineral	Formula	Ocurrencia	DRX	SWIR
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Localizada en areas activas en pH aproximados a 4 en condiciones de temperatura <150-200 °C, asociada con montmorillonita ± cuarzo	X	X
Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ •nH ₂ O	Asociada principalmente a caolinita ± cuarzo indicando alteracion argilica	X	X
Dickita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Asociada principalmente a alunita ± caolinita ± jarosita como fase accesorio, esta asociacion indica un grado extremo de hidrolisis		X
Esmectitas	Variable	Aparece todas las muestras, con asociaciones diferentes		X
Opalo	SiO ₂ •nH ₂ O	Aparece en asociaciones de cristobalita ± cuarzo, cuyos minerales son estables en fluidos con pH <2 tipicamente a t° <100 °C		X
Cristobalita	SiO ₂	Comunmente formado en ambientes superficiales de un sistema hidrotermal, se presenta en asociacion con el opalo ± esmectitas	X	
Cuarzo	SiO ₂	Aparece practicamente en todas las muestras, con asociaciones diferentes, cuya formacion esta siempre por encima de los 100 °C	X	X
Calcita	CaCO ₃	Aparece asociada con esmectitas, se presentan en un amplio rango de pH	X	
Hematita	Fe ₂ O ₃	Aparece como producto de la oxidacion, posiblemente a una disminucion de la actividad de H ₂ S	X	
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Su presencia indica bajo grado de hidrolisis de los minerales de las rocas	X	
<i>Minerales acido-sulfato identificados</i>				
Alunita	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Zonas calentadas por vapor en baja sulfuracion, asociada con esmectita ± dickita ± cuarzo propia de la alteracion argilica avanzada	X	
Jarosita	KFe ₃ ⁺³ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Localizado en areas de mediana actividad, junto con yeso ± esmectita ± dickita	X	
Yeso	CaSO ₄ • 2H ₂ O	Precipita regularmente en areas de baja y alta actividad, asociado con jarosita ± opalo ± esmectita	X	

El CGH al no presentar pozas de lodo (mud pots), manantiales calientes (hot springs), ni descargas laterales, pero si zonas con escapes de vapor en forma de fumarolas y suelos calientes vaporizantes, manifestaciones que son liberadas en pequeñas cantidades de vapor a través de suelos porosos, con

temperaturas de entre 50 – 89°C (Tinoco, 2009), por lo la alteración hidrotermal es originada principalmente a la interacción de vapor de origen profundo con aguas someras y a la circulación de fluidos por las fallas principales del sistema (Tello-Hinojosa, 2005), las asociaciones de alteración superficial identificadas en el presente estudio mediante DRX y SWIR son para rocas sin aparente fallamiento o fuente activa cercana esmectitas ± caolinita ± cuarzo ± cristobalita, para la zonas de alteración con control estructural muestran un mayor contenido de SiO₂ e incluye ópalo ± cristobalita ± cuarzo ± esmectitas ± dickita ± calcita y para las zonas activas (fumarolas) las asociaciones contiene minerales sulfatados alunita ± jarosita ± yeso ± esmectitas ± dickita + ópalo, los anteriores asociaciones indica que la alteración es producida por la segregación de vapor rica en volátiles como CO₂, H₂S y H₂ (gas), gases que son separados de un cuerpo de agua debido a fenómenos de ebullición discutidos en la sección de IF en el presente trabajo donde principalmente es debido a la despresurización provocada por el sistema de fallas, posterior a la fase de segregación, la sublevación de vapores ricos en componentes volátiles reaccionan con aguas oxigenadas subterráneas produciendo aguas sulfatadas acidas con base a la siguiente reacción:



Produciendo tres distintos grupos de agua geotérmica superficial basado en su composición: aguas ricas en NaCl (pH>8), aguas acido sulfatadas derivadas del vapor rico en volátiles (pH<4) y aguas geotérmicas mixtas (Carson, 2015), las cuales controlan la interacción agua - roca superficial. Se ha comprobado en diversos campos geotérmicos (Krafla, Námafjall) que la interacción de aguas sulfatadas con rocas básicas – intermedias produce ensambles mineralógicos característicos de alteraciones argílica, argílica avanzada y silicificación (Stefánsson, 1981; Carson, 2015).

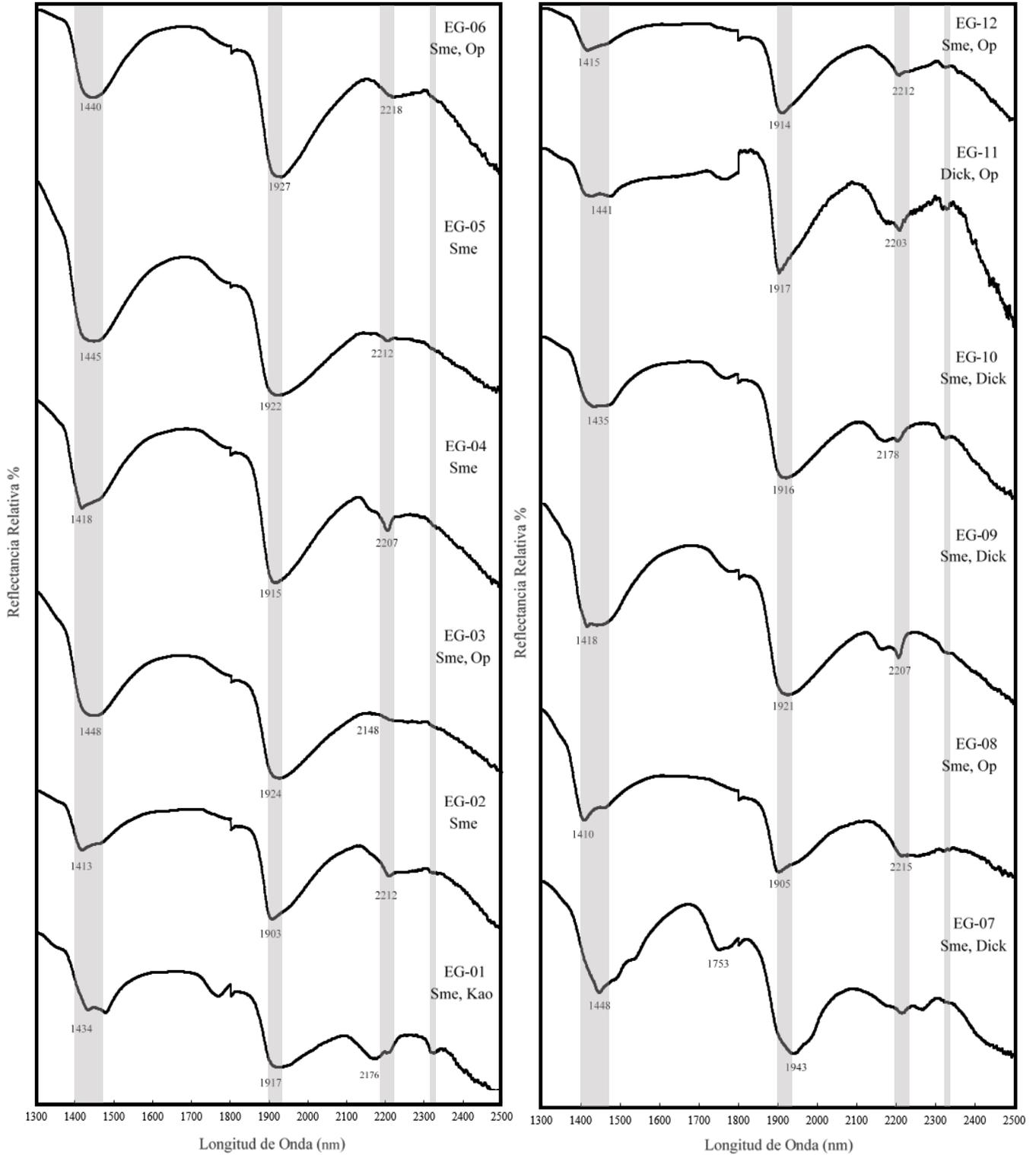


Figura 29. Espectros representativos de los principales minerales de alteración obtenidos por espectroscopia de reflectancia (SWIR) de las 12 muestras de rocas alteradas del CGLH. Esmectita (Sme) cuyo espectro característico está marcado en gris claro, Caolinita (Kao), ópalo (Op), dickita (Dick).

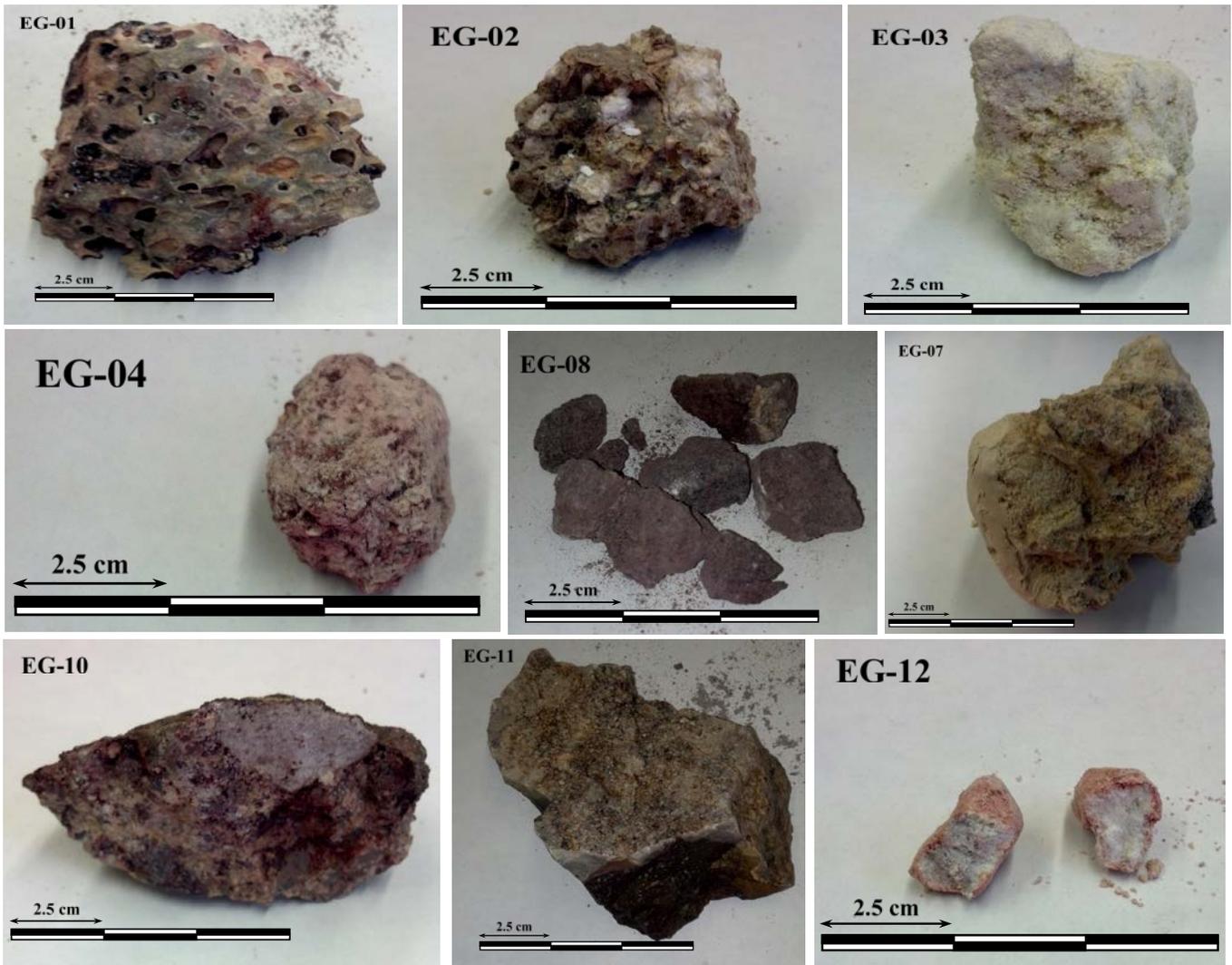


Figura 30. Fotografías de muestras especiales, EG-01 basalto alterado, EG-02 basalto con un grado de alteración mayor, EG-03 roca con alteración pervasiva-intensa, EG-04 roca alterada de la Falla Las Habas, EG-07 roca con alteración pervasiva-intensa, EG-08 roca alterada de la Falla Xalapazco, EG-10 roca con minerales de alteración como esmectita, dickita y cuarzo, EG-11 roca con alteración argílica avanzada (falla Humeros) y finalmente la muestra EG-12 roca con alteración pervasiva con minerales de alteración como esmectita, ópalo yeso y jarosita.

Los minerales identificados como la esmectita, ópalo, caolinita y dickita, son fases de minerales reportados en otros sistemas geotérmicos en México (Acoculco, Azufres, La Primavera, etc.), y en depósitos epitermales cuya asociación indica alteración argílica avanzada (Stefánsson, 1981; Carson, 2015; Canet et al., 2015). En el caso del ópalo generalmente se produce en asociación con tridimita y anatasa cabe mencionar que estos minerales no fueron identificados mediante SWIR o DXR pero no se descarta su ocurrencia en el CGH la caolinita tiene mayor presencia en manifestaciones superficiales activas y se asocia a dickita, alunita, montmorillonita y a illita/esmectita, minerales si identificados mediante SWIR y DRX. Los minerales como ópalo, caolinita, esmectita y dickita son indicadores de condiciones específicas (pH ácido entre 2-4 y temperaturas <math><150^{\circ}\text{C}</math>) que rigen las reacciones agua-rocas que se están llevando a cabo en el CGH.

VII.IV Geoquímica

VII.IV.I Elemento Mayores de la Alteración Hidrotermal Superficial

Se le llama elementos mayores a aquellos que se presentan en altas concentraciones (>1% en peso), son estos controlan en gran medida la cristalización del magma. Se representan en forma de óxidos (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O_{3T}, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O y P₂O₅) y por lo general son utilizados en diagramas para la clasificación de rocas (TAS, AFM, Peacock) y diagramas de variación (Harker) estos son aplicables únicamente cuando la roca no presente ningún tipo de alteración hidrotermal. Los resultados del análisis geoquímico de elementos mayores de las 15 muestras especiales se muestran en la Tabla 8. Es de importancia mencionar que todas las rocas de EG-1 a EG-12 presentan algún tipo y grado de alteración, y solo EG-13, 14 y 15 son rocas inalteradas y cogenéticas de las alteradas, es importante señalar que la muestra EG-15 muestran un pequeño grado de alteración asociado a oxidación superficial.

Tabla 8. Composición de elementos mayores de las 15 muestras de roca alterada de superficie. Las muestras en azul corresponden a rocas inalteradas. El Hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Suma
	%											
EG-01	43.53	1.02	18.70	6.09	0.02	0.31	7.51	1.76	1.54	0.25	19.25	99.96
EG-02	79.80	1.26	6.75	2.13	0.03	0.53	1.21	0.71	0.72	0.25	6.56	99.94
EG-03	38.43	0.64	1.81	0.25	0.01	0.06	0.12	0.02	0.29	0.03	58.33	99.97
EG-04	62.82	0.58	18.22	3.38	0.05	0.59	0.96	0.52	2.63	0.09	10.10	99.93
EG-05	67.29	0.93	16.51	2.89	0.06	0.29	0.80	0.18	1.62	0.06	9.30	99.93
EG-06	64.92	0.52	15.92	3.01	0.06	0.79	1.88	3.61	4.20	0.14	4.87	99.92
EG-07	53.85	0.64	5.19	7.83	0.01	0.10	14.99	0.32	2.35	0.19	14.50	99.96
EG-08	61.35	0.96	16.89	5.26	0.09	2.24	4.55	4.15	2.17	0.26	2.00	99.92
EG-09	47.76	0.72	17.95	11.73	0.01	0.17	0.22	1.03	1.31	0.28	18.78	99.94
EG-10	54.78	0.86	17.21	2.63	0.02	0.31	0.59	1.43	3.07	0.24	18.79	99.93
EG-11	65.85	0.95	15.15	3.34	0.05	1.30	2.60	3.37	2.84	0.25	4.21	99.91
EG-12	74.62	0.86	10.90	2.47	0.04	0.46	0.71	0.37	2.14	0.08	7.23	99.88
EG-13	48.56	1.51	17.15	10.47	0.16	8.56	10.22	3.27	0.36	0.20	-0.58	99.89
EG-14	56.81	1.34	16.93	7.89	0.12	3.60	6.98	4.24	1.75	0.32	-0.11	99.87
EG-15	60.50	1.52	13.90	8.20	0.07	1.13	3.37	2.45	1.77	0.33	6.71	99.93

VII.IV.I.I Índices de Alteración

Se determinó el grado de alteración de las 12 muestras especiales que presentan hidrotermalismo para esto se hizo uso del Índice Químico de Alteración (IQA) este parámetro se utiliza para discriminar procesos de intemperismo reciente y la alteración hidrotermal en sistema hidrotermales fósiles, sin embargo en un sistema hidrotermal activo el IQA se ha utilizado para determinar la alteración argílica avanzada cuando los valores son cercanos o mayores a 80 (Nesbitt & Young, 1982). El IQA se basa en la inmovilidad del Al durante los procesos de alteración por intemperismo o hidrotermal este parámetro se calcula a partir de la siguiente fórmula (Ishikawa *et al.*, 1976):

$$IQA = \frac{100 \times Al_2O_3}{(Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)} \quad (1)$$

Con base a los resultados obtenidos del cálculo del IQA (Tabla 9), las muestras que presentan alteración argílica avanzada son EG-03, EG-04, EG-05 y EG-09, las cuales fueron tomadas en fuentes activas (fumarolas) y zonas de intensa alteración. Las muestras del espejo de la falla de Los Humeros EG-10 y EG-12 aunque no presentan valores >80 en el IQA se encuentran muy cercanos a este valor; sin embargo de acuerdo a los resultados obtenidos por DRX y SWIR las asociaciones minerales de estas muestras nos indican una alteración argílica avanzada.

Tabla 9. Índice Químico de Alteración (IQA) de las 12 muestras superficiales de alteración

Muestra	EG-01	EG-02	EG-03	EG-04	EG-05	EG-06	EG-07	EG-08	EG-09	EG-10	EG-11	EG-12
IQA	63.37	71.95	80.94	81.63	86.39	62.16	22.72	60.82	87.53	77.17	63.21	77.16

Existe otro parámetro que se usa para determinar el índice de silicificación (IS), este mide relativamente el agotamiento del Al con respecto al enriquecimiento de Si, y se puede realizar el cálculo de este parámetro a partir de la siguiente formula (Ishikawa *et al.*, 1976):

$$IS = \frac{100 \times SiO_2}{(SiO_2 + Al_2O_3)} \quad (2)$$

Tabla 10. Índice de Silicificación (IS) de las 12 muestras superficiales de alteración.

Muestra	EG-01	EG-02	EG-03	EG-04	EG-05	EG-06	EG-07	EG-08	EG-09	EG-10	EG-11	EG-12
IS	69.95	92.20	95.51	77.51	80.30	80.31	91.21	78.42	72.69	76.09	81.30	87.25

Los resultados obtenidos del IS nos indica que las muestras que presenta silicificación son EG-02, EG-03, EG-05, EG-06, EG-07, EG-11 y EG-12 el obtener un alto índice de silicificación indicaría un empobrecimiento con respecto al Al. Los resultados determinados son congruentes con el índice químico de alteración (Pirajno, 2009). La silicificación es producto de un intenso metasomatismo de H⁺ y una lixiviación acida de minerales aluminio-silicatos que puede dar un enriquecimiento de sílice (calcedonia, ópalo, cuarzo, etc.).

El índice de alteración (Pirajno, 2009) se resume de la siguiente forma:

$$Indice\ de\ Alteracion = \frac{Elemento\ Enriquecido}{Elemento\ enriquecido + Elemento\ Empobrecido} \times 100$$

El elemento enriquecido guarda una estrecha relación con el elemento empobrecido, debido a que ambos forman parte de la misma ecuación química en donde uno sustituye al otro durante la alteración hidrotermal.

Otra forma de hacer una aproximación al grado de alteración al que pudieron estar sujetas las rocas es por medio del valor de perdida por calcinación que se reporta en la Tabla 8, referido como PXC (Pilar-

Martínez, 2015), los valores obtenidos en las muestras de CGH son considerados altos con un máximo de 58.33% para las rocas alteradas, lo que indica gran contenido de H₂O probablemente en minerales sulfatados hidratados o arcillas. Cabe señalar que el Al es empobrecido en depósitos silícicos de moderada actividad superficial, mientras que en áreas donde la caolinita se hace presente se exhibe un enriquecimiento en Al, de esta forma la movilidad del Al está limitada por las zonas que están constituidas principalmente por caolinita, esmectitas y montmorillonita identificados por SWIR y DRX.

VII.IV.I.II Diagramas de Variación de Elementos Mayores

Se realizaron diagramas bivariantes o “diagramas de tipo Harker”, esto se hizo con la finalidad de encontrar parámetros que muestren variaciones sistemáticas, que permitan inferir los procesos de enriquecimiento o empobrecimiento durante la alteración hidrotermal superficial del CGLH de manera gráfica. Para la obtención de estos diagramas se utilizaron los datos de la Tabla 11, que cuenta con los valores de los elementos mayores de las rocas inalteradas e alteradas.

Tabla 11. Elementos Mayores de las muestras de roca alterada (RA) de superficie y su correspondiente roca inalterada (RI). Los análisis de la muestra TC-13A fue tomado de Dávila-Harris y Carrasco Núñez, 2014. El Hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Litología	Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Suma
%													
R. Alterada	EG-01	43.53	1.02	18.70	6.09	0.02	0.31	7.51	1.76	1.54	0.25	19.25	99.96
R. Alterada	EG-02	79.80	1.26	6.75	2.13	0.03	0.53	1.21	0.71	0.72	0.25	6.56	99.94
R. Alterada	EG-04	62.82	0.58	18.22	3.38	0.05	0.59	0.96	0.52	2.63	0.09	10.10	99.93
Basalto - Andesita	EG-13	48.56	1.51	17.15	10.47	0.16	8.56	10.22	3.27	0.36	0.20	-0.58	99.89
R. Alterada	EG-07	53.85	0.64	5.19	7.83	0.01	0.10	14.99	0.32	2.35	0.19	14.50	99.96
R. Alterada	EG-08	61.35	0.96	16.89	5.26	0.09	2.24	4.55	4.15	2.17	0.26	2.00	99.92
Andesita	EG-14	56.81	1.34	16.93	7.89	0.12	3.60	6.98	4.24	1.75	0.32	-0.11	99.87
R. Alterada	EG-03	38.43	0.64	1.81	0.25	0.01	0.06	0.12	0.02	0.29	0.03	58.33	99.97
R. Alterada	EG-05	67.29	0.93	16.51	2.89	0.06	0.29	0.80	0.18	1.62	0.06	9.30	99.93
R. Alterada	EG-10	54.78	0.86	17.21	2.63	0.02	0.31	0.59	1.43	3.07	0.24	18.79	99.93
R. Alterada	EG-11	65.85	0.95	15.15	3.34	0.05	1.30	2.60	3.37	2.84	0.25	4.21	99.91
R. Alterada	EG-12	74.62	0.86	10.90	2.47	0.04	0.46	0.71	0.37	2.14	0.08	7.23	99.88
Andesita - Basalto	EG-15	60.50	1.52	13.90	8.20	0.07	1.13	3.37	2.45	1.77	0.33	6.71	99.93
R. Alterada	EG-06	64.92	0.52	15.92	3.01	0.06	0.79	1.88	3.61	4.20	0.14	4.87	99.92
R. Alterada	EG-09	47.76	0.72	17.95	11.73	0.01	0.17	0.22	1.03	1.31	0.28	18.78	99.94
Toba	TC-13A	66.10	0.67	16.82	4.18	0.08	0.97	2.14	5.21	3.67	0.17	3.58	100.01

Los diagramas de variación química de elementos mayores de las muestras de superficie inalteradas muestran variación en la composición relativa con respecto a las rocas alteradas (RA). Para las rocas inalteradas (RI) se presentan tendencias lineales tanto negativas como positivas, para las negativas tenemos los siguientes elementos TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃T, MnO, MgO y CaO y en las positivas Na₂O y K₂O,

estas se diferencian por el sombreado en gris (Figura 31). Estas tendencias se pueden explicar debido a los diferentes procesos de cristalización fraccionada durante la evolución de los líquidos magmáticos (Rollison, 1993). Las pendientes negativas de TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ y MgO observadas en los diagramas de variación corresponden al fraccionamiento de los minerales ferromagnesianos, mientras que las tendencias positivas en las RI de superficie fueron del Na_2O (2.14-10.60 %) y K_2O (0.26-3.67 %) observándose así un enriquecimiento con respecto al de SiO_2 (66.10-48.36 %), pudiendo estar relacionado con la acumulación del Na_2O y K_2O en el magma y su separación en etapas posteriores este tipo de proceso fue visualizado por Pilar-Martínez, (2015). El mecanismo que se mencionó anteriormente dio origen a las rocas del CGH desde los basaltos hasta la riolitas, estos fueron derivados de un mismo magma parental, cuya fuente se ubica en la parte superior del manto (Verma, 1983; 1984).

La relación entre las rocas inalteradas con respecto a las rocas alteradas, refleja en general una disminución de TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MnO , MgO , CaO y Na_2O ; mientras que algunas muestran un enriquecimiento de Al_2O_3 y K_2O . Las rocas inalteradas de superficie muestran empobrecimiento en TiO_2 de 1.48 a 0.67 %, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ de 10.94 a 4.18 %, MnO de 0.17 a 0.08 %, MgO de 8.51 a 0.97 % y CaO de 10.60 a 2.14 %, esto respecto al incremento de SiO_2 de 48.36 a 66.10 %. Para el Al_2O_3 fue de 17.37 a 16.77%, la tendencia fue atenuada por las rocas alteradas, sin embargo se observa una tendencia negativas como los demás elementos empobrecidos.

Las rocas alteradas mostraron tendencias más dispersas, que puede ser explicado por el grado de interacción agua – rocas. Las rocas que se consideraron originalmente como basaltos y andesitas presentaron empobrecimiento con respecto a las rocas inalteradas en elementos como TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MnO , MgO , CaO . Algunas muestras que se consideraron como tobas mostraron un ligero enriquecimiento en Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ y K_2O con respecto a una disminución de SiO_2 . Las tendencias observadas son muy diferentes a las de las rocas inalteradas, para el caso del TiO_2 (0.52-1.26 %) muestra un enriquecimiento con respecto al SiO_2 (38.43-79.80 %), otros elementos que presentaron enriquecimiento son Al_2O_3 (5.19-18.70 %), MnO (0.01-0.09 %), MgO (0.10-2.24 %), Na_2O (0.72-4.15), K_2O (0.72-4.20 %), sin embargo al tener varios puntos de inflexión hacen de estas una tendencias difusas. Solo el Fe_2O_3 (11.73-2.13) mostro una tendencia al empobrecimiento con respecto al incremento de SiO_2 (38.43-79.80 %). Las muestras que presentaron alteración pervasiva mostraron tendencias más claras, observándose en estas un enriquecimiento de todos los elemento (TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MnO , MgO , CaO , Na_2O y K_2O) con respecto al incremento del SiO_2 .

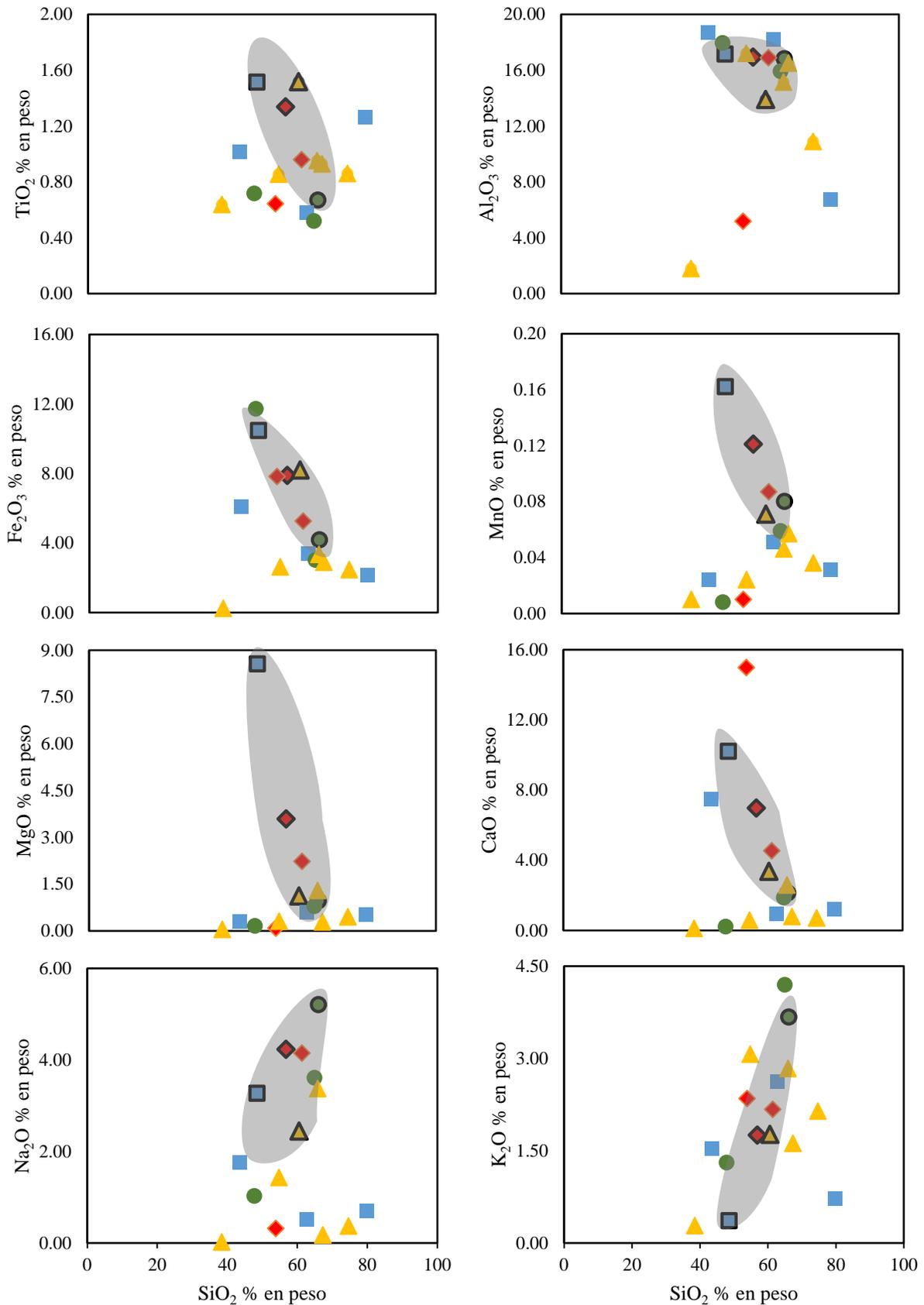


Figura 31. Diagramas de variación Harker de elementos mayores vs SiO₂, mostrando la relación entre las rocas alteradas e inalteradas
 ■ Basaltos- Andesita EG-13, ◆ Andesita EG-14, ▲ Andesita – Basalto EG-15, ● Toba TC-13A y rocas alteradas ■ Basaltos- Andesita EG-01, 02 y 04, ◆ Andesita EG-07 y 08, ▲ Andesita – Basalto EG-03, 05, 10, 11 y 12, ● Toba EG-06 y 09.
 El Hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

La superficie volcánica del CGH se puede considerar como un sistema abierto, donde los vapores volcánicos ascienden y se mezclan con aguas oxigenadas subterráneas y superficiales, de esta forma los cambios en la concentración de los elementos mayores son originados por el grado de interacción de la roca con los fluidos sulfatados ácidos cuyo pH es controlado por diversos factores como la oxidación del H₂S a sulfato, por la acidez generada por la oxidación del azufre nativo por la reacción de $S^0 + 1.5 O_2 + H_2O \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$, por la oxidación del sulfuro disuelto que se produce lentamente de SO_3^{2-} y $S_2O_3^{2-}$ y finalmente a sulfato (Kaasalaninen & Stefánsson, 2011), el alto contenido generado de H⁺ en los fluidos ácidos es amortiguado por varios factores: por la segunda constante de disociación del ácido sulfúrico (HS₄⁻/SO₄²⁻) y principalmente por el consumo de H⁺ por las rocas (basalto – andesita – toba) amortiguando el pH y posteriormente liberando cationes a la solución SiO₂, Fe²⁺, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, etc., la liberación de cationes a la solución depende de la estabilidad de los minerales ígneos primarios bajo fluidos sulfatados ácidos del más reactivo a menos reactivo bajo el siguiente orden: olivino > titanomagnetita > plagioclasas > clinopiroxeno (Stefánsson *et al.*, 2001), esta movilidad ocasionada por la interacción agua-roca ocasiona el empobrecimiento progresivo de todos los elementos mayores, a excepción del Si, la movilidad elemental ha sido identificada y reportada en diversos campos geotérmicos como en Los azufres (Pandarinath *et al.*, 2008), Krýsuvík en Islandia (Markússon & Stefánsson, 2011), Krafla y Námafjall al norte de Islandia (Carson, 2015), por ejemplo la movilidad del Al decrece rápidamente con el incremento del pH, atribuido a la formación de caolinita en áreas de mediana y baja actividad (Markússon & Stefánsson, 2011), en este estudio se confirma que la caolinita es el mayor productor de alteración en el CGH, en el caso del ligero aumento de una de las muestras en Ca precisamente en una área de intensa actividad puede ser atribuido a la formación de yeso, para las excepciones de las muestras que presentaron incremento en Na, K y Fe, puede estar relacionado con la formación de alunita (KAl₃(SO₄)₂(OH)₆) y jarosita (KFe⁺³(SO₄)₂(OH)₆), en el enriquecimiento de Si está directamente relacionado con la formación de cuarzo secundario, ópalo, y cristobalita principalmente en áreas de intensa actividad superficial.

La tendencia de las rocas alteradas al enriquecimiento de K₂O y empobrecimiento de Fe₂O_{3T}, ya había sido confirmado por Martínez-Serrano *et al.* (1994), quienes también determinaron que a medida que aumenta la profundidad a zonas más alteradas se mostraba un aumento de TiO₂, Fe₂O_{3T}, CaO, Na₂O y K₂O y una disminución de Si₂O y K₂O.

VII.IV.II Elementos Traza y Tierras Raras de la Alteración Hidrotermal Superficial

Se realizó el análisis de las 15 muestras especiales, de estas 12 corresponden a rocas alteradas y 3 a rocas inalteradas. Esta determinación se llevó a cabo por la técnica de ICP-MS para elementos traza y tierras raras (REE). Los resultados, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Composición de elementos traza de las 15 muestras de roca de superficie. EG-01 a EG- 12 corresponden a rocas alteradas y EG- 13 a EG-15 corresponden a rocas inalteradas.

Muestra	TiO ₂	B	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr
	%	µg.g ⁻¹												
EG-01	0.89	4.01	2.85	1.29	14.26	137.16	14.69	6.10	4.45	35.26	38.80	15.58	28.14	331.83
EG-02	1.13	7.61	2.34	0.99	5.16	62.68	7.85	4.33	2.27	37.71	29.67	12.14	24.19	164.33
EG-03	0.44	4.11	0.61	0.37	N.D	6.57	3.10	0.45	0.13	3.91	15.77	2.47	8.60	10.97
EG-04	0.53	19.93	3.13	3.31	4.58	29.13	6.66	5.72	1.29	6.97	44.49	20.09	82.29	100.92
EG-05	0.82	11.18	1.85	3.87	3.88	9.51	3.23	2.62	0.48	8.46	47.10	21.54	56.30	69.71
EG-06	0.46	26.28	17.49	3.49	5.36	22.54	7.22	4.26	4.39	6.99	49.30	19.33	104.80	153.24
EG-07	0.48	2.36	0.64	0.25	2.94	24.85	21.64	0.89	7.35	13.36	11.53	24.56	13.47	211.25
EG-08	0.90	12.95	15.46	2.20	10.28	81.69	16.15	12.92	17.02	26.48	61.46	20.49	46.91	380.31
EG-09	0.67	2.63	1.04	1.43	13.98	110.85	22.80	1.19	1.68	14.37	17.81	17.65	17.46	435.22
EG-10	0.79	55.80	3.39	1.29	8.20	69.35	34.23	2.49	2.86	16.51	24.56	20.11	51.21	345.94
EG-11	0.90	10.85	10.87	1.90	9.48	78.93	36.48	7.29	13.51	18.21	46.39	20.48	66.78	341.31
EG-12	0.71	12.83	3.29	2.11	2.77	14.74	4.31	1.55	0.46	7.10	27.82	16.39	47.96	92.51
EG-13	1.51	1.35	5.96	1.00	30.98	200.72	139.64	43.39	34.72	60.57	71.64	18.30	4.22	386.40
EG-14	1.34	6.29	13.24	1.86	22.40	162.10	45.45	24.69	15.04	35.85	75.76	20.81	47.51	456.52
EG-15	1.43	6.16	4.44	1.95	12.50	142.18	15.03	12.01	5.58	30.03	61.72	18.97	42.17	349.61

Muestra	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Th	U
	µg.g ⁻¹														
EG-01	24.70	156.38	9.17	1.68	1.01	0.11	0.87	315.20	3.34	0.56	0.25	0.17	6.48	4.91	1.35
EG-02	8.47	242.88	12.00	1.83	1.29	0.18	1.94	432.36	4.75	0.87	0.32	0.73	8.46	3.24	0.83
EG-03	2.29	223.66	9.59	2.41	1.52	0.34	0.54	177.87	4.47	0.65	0.42	0.11	3.64	1.69	0.56
EG-04	20.81	407.16	17.44	3.83	2.83	0.56	3.17	525.51	8.42	1.30	0.72	1.74	14.77	12.70	3.35
EG-05	29.52	617.99	26.63	3.90	4.14	0.61	3.37	593.15	12.90	2.02	0.80	1.13	23.33	17.99	4.79
EG-06	27.41	365.48	17.71	4.83	3.08	0.75	4.14	617.94	8.28	1.41	1.18	1.04	16.76	17.26	4.81
EG-07	3.90	160.95	7.39	0.93	0.87	0.20	0.77	203.76	3.19	0.46	0.24	0.24	6.30	2.31	0.66
EG-08	20.28	285.75	18.76	2.56	1.70	0.34	1.82	610.10	5.86	1.76	0.69	0.27	11.72	9.65	2.66
EG-09	5.79	156.62	8.23	2.37	1.08	0.29	1.30	446.53	3.38	0.54	0.28	0.67	8.21	8.30	1.09
EG-10	11.43	289.27	14.39	2.95	2.13	0.52	2.30	611.97	6.13	1.03	0.58	0.48	13.15	9.78	2.70
EG-11	20.78	312.24	16.40	3.20	2.19	0.48	2.00	711.46	6.78	1.12	0.66	0.47	14.18	10.93	3.42
EG-12	15.18	520.00	22.67	4.37	3.62	2.30	2.13	826.31	11.08	1.70	0.91	0.57	14.35	12.20	2.94
EG-13	24.70	131.68	5.66	1.20	1.06	0.06	0.03	91.69	2.92	0.39	0.06	0.04	1.74	0.72	0.20
EG-14	26.63	236.58	14.45	1.86	1.49	0.13	1.12	498.54	4.86	0.96	0.35	0.34	8.19	5.08	1.48
EG-15	24.09	268.79	15.51	2.41	1.68	0.18	1.60	578.17	5.75	0.97	0.42	0.52	10.50	5.74	1.70

VII.IV.II.I Clasificación Química de Rocas

La clasificación química de las rocas se realizó mediante el diagrama de Winchester y Floyd (1977) debido a que las rocas analizadas presentan diferente grados de alteración hidrotermal. El uso de este diagrama de discriminación plantea a los elementos traza relativamente inmóviles durante diferentes procesos (Nb/Y vs Zr/TiO₂), favoreciendo su uso para rocas alteradas por hidrotermalismo.

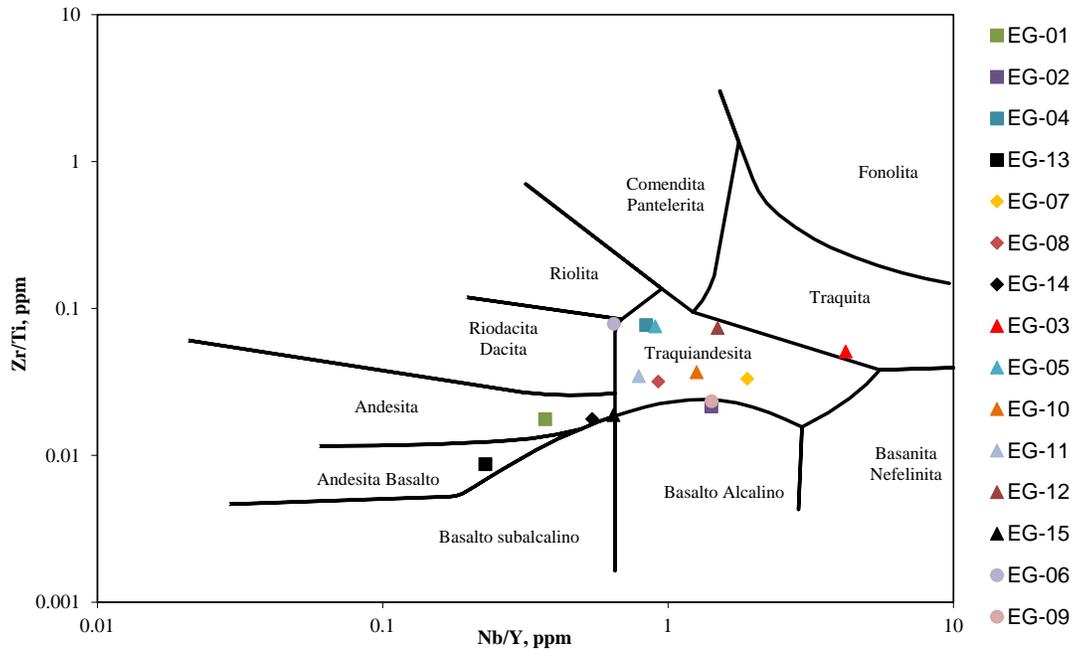


Figura 32. Diagrama de clasificación para rocas alteradas Nb/Y vs Zr/Ti (Winchester y Floyd, 1977). EG- 13 corresponde a la roca inalterada de EG-01, 02 y 04. EG-14 corresponde como roca inalterada a EG-07 y 08., y EG-15 es la roca inalterada de EG-03, 05, 10, 11 y 12.

Los resultados obtenidos en el diagrama de discriminación de elementos inmóviles Nb/Y vs Zr/Ti (Figura 32) indican que las rocas frescas de superficie varían de andesita - basalto (EG-13), andesita (EG-14) y basalto - andesita (EG-15), mientras que sus correspondientes rocas alteradas exhiben variaciones significativas cambiando de andesita - basalto (EG-13) a andesitas (EG-01), traquiandesitas (EG-02) y a basaltos (EG-03), para la andesita (EG-14) varía a traquiandesitas (EG-07 y 08), mientras que para los basaltos - andesita (EG-15) se modifica principalmente a traquiandesitas (EG-05, 10, 11 y 12) solo una de las muestras presentó una variación a traquita (EG-30). La relación para las rocas alteradas varía en un rango de 0.37-4.19 ppm para Nb/Y, mientras que para Zr/Ti ppm es de 0.01-0.05 ppm.

Las tobas presentan una composición más ácida a riodacita – dacita, esto a excepción de la muestra EG-09 que exhibió una composición química a traquiandesita.

Las variaciones más significativas se presentaron en rocas alteradas en fuentes termales activas (EG-03, EG-12 y EG-05), donde la alteración varía de argílica a argílica avanzada – ácido sulfato (alunita). En general las rocas alteradas exhibieron cambios a una composición más ácida a la original, observándose mayor dispersión a la composición original cuando es mayor el grado de interacción agua – roca.

Pilar-Martínez (2015) puso en evidencia la existencia de variación entre las mismas rocas con el uso de diagramas de clasificación de rocas en el CGH, ya sea el de Winchester y Floyd (1977) ó Le Bast *et al.* (1986) esta variación es debido principalmente a la alteración hidrotermal, demostrándose con base a

clasificaciones petrográficas que la clasificación de Winchester y Floyd (1977) era correcta. Sin embargo en los resultados obtenidos se observa que existe variación en la composición química de las rocas cogenéticas dentro de la misma clasificación de Winchester y Floyd (1977), lo cual obedece al grado de alteración de las rocas.

VII.IV.II.II Diagramas Multielementos

Los elementos traza son generalmente clasificados con base a su potencial iónico o densidad de carga (z/r : carga del ion/radio del ion), donde los elementos incompatibles (aquellos que tienen preferencia en concentrarse en la fase líquida durante la fusión y cristalización) se subdividen en alto y bajo potencial iónico (Rollinson, 1993). Los elementos de alto potencial iónico (**HFS**, *High Field Strength*), tienen un $z/r > 2$ e incluyen el Y, Th, U, Pb, Zr, Hf, Nb y Ta, mientras que los elementos de bajo potencial iónico conocidos como elementos litófilos de radio iónico grande (**LILE**, *Large Ion Lithophile Elements*), los cuales tienen un $z/r < 2$ e incluyen elementos como Cs, Rb, Ba, Sr y Eu.

Los resultados de las 15 muestras especiales de superficie (alteradas como inalteradas) se normalizaron con respecto al manto primitivo (composición del manto antes de que se formara la corteza continental), los valores utilizados fueron los de Sun y McDonough (1989) de 13 elementos traza y 12 elementos de REE, expresados en escala logarítmica en bases diez.

En el diagrama multielementos de las 15 muestras especiales (Figura 33 a, b y c), las rocas alteradas (RA) muestran una tendencia general a disminuir en su concentración elemental con respecto a la incompatibilidad de elementos del Cs al Lu, exhibiendo un patrón de comportamiento similar al de las rocas inalteradas (RI). Sin embargo las RA muestran una mayor concentración en HFS y LILE con respecto a las RI a excepción de la muestra EG-07 la cual presenta alteración silícica y EG-03 que corresponde a una muestra tomada en una fuente activa. Las rocas alteradas presentan anomalías negativas en Nb y positivas para Th, U, Pb y Zr en elementos HFS. En elementos LILE existen anomalías positivas para Cs, y anomalías negativas en Sr y Rb en EG-03 y EG-5 que pertenecen a fuentes activas. Cabe destacar que estas anomalías son más perceptibles en las muestras que fueron tomadas de fuentes activas (EG-03, 05 y 12) cuya roca presenta alteración argílica pervasiva de intensidad fuerte.

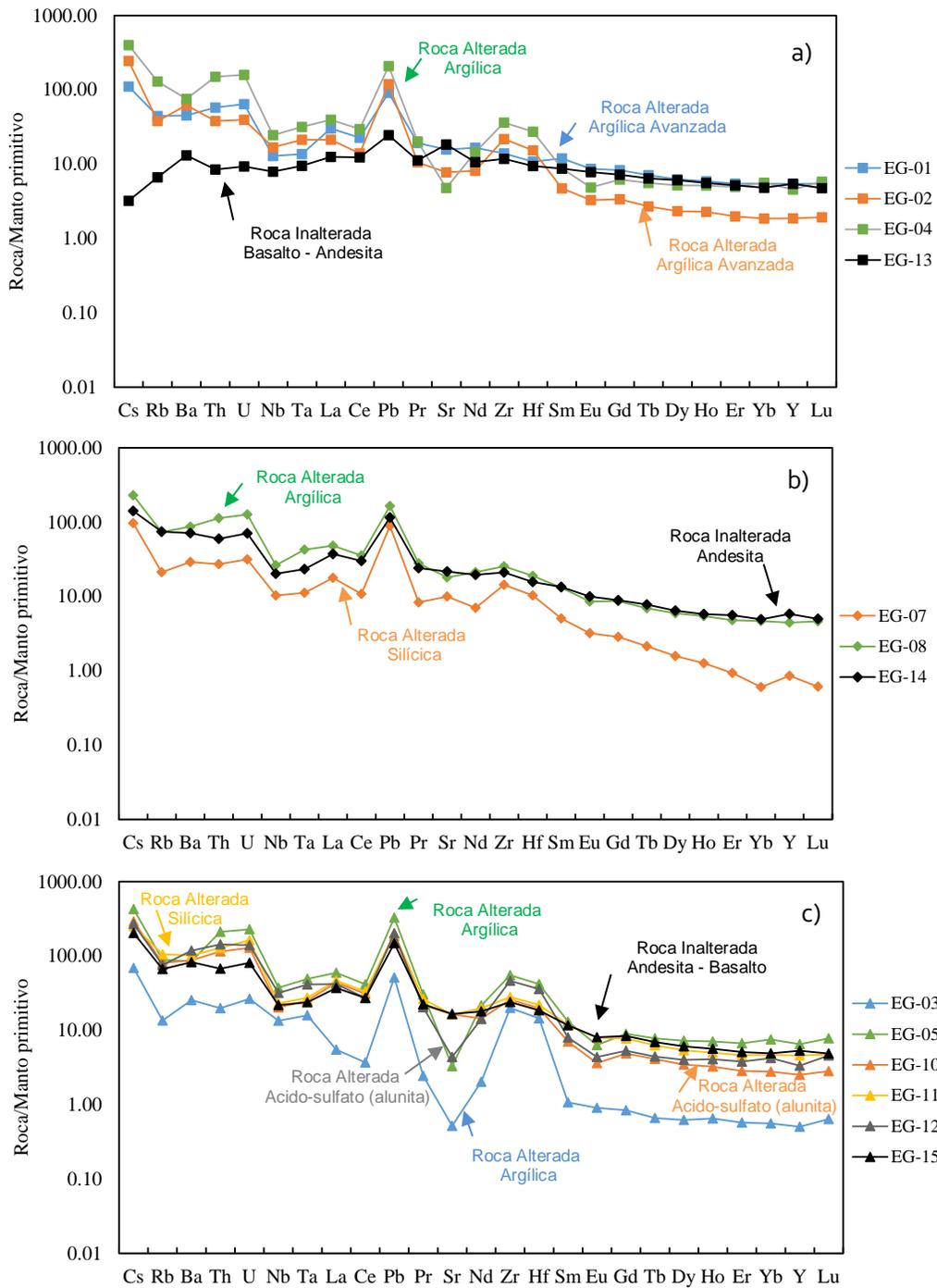


Figura 33. Diagrama multielementos, normalizados a manto primitivo de muestras alteradas (líneas de color) con respecto a su roca inalterada (línea negra) del CGLH (Sun y McDonough, 1989).

De acuerdo a lo expuesto por Pilar-Martínez (2015) el patrón mostrado para rocas inalteradas donde se observa un enriquecimiento en LILE y empobrecimiento en HSF reflejar el aporte de una fase acuosa transportada por la corteza oceánica subducida, característica distintiva de los magmas formados en ambientes de subducción en un arco volcánico como es el caso del CVTM, este mismo patrón se observa en rocas alteradas pero con concentraciones que difieren de acuerdo al grado de alteración de la rocas.

Por ejemplo en el caso de EG-03 y 07 muestran un patrón mayormente empobrecido con respecto a sus rocas cogenéticas. La movilidad del Cs, Rb, Ba, Th y Sr se debe a su bajo potencial iónico (carga/radio) lo que propicia su migración bajo fluidos hidrotermales durante a la alteración hidrotermal (Pearce, 1982, Kaasalainen, et al., 2015) de esta manera los elementos móviles actúan como vectores geoquímicos hacia áreas de mayor flujo de fluido, mientras que los elementos inmóviles distinguen a las rocas precursoras de las alteradas. En el sistema geotérmico como lo es Los Humeros la identificación de zonas activas o inactivas de alto flujo de fluido proporciona zonas de alimentación de pozos (Mauriohooho et al., 2016). La movilidad del Cs, Rb y Ba observada en los diagramas multielementos refleja el aumento en la interacción agua-roca, muy probablemente por la formación de esmectita/illita, mientras que la movilización del Sr es consistente con la destrucción de plagioclasas cálcicas (sustitución del Sr por el Ca), por lo que es posible que las plagioclasas cálcicas hayan sido alteradas y reemplazadas por esmectita/illita (Mauriohooho et al., 2016, Kaasalainen, et al., 2015). Y aunque en el presente estudio no se analizaron fluidos geotérmicos, la movilidad de Cs, Rb, Ba, Th y Sr se ha confirmado en otros campos geotérmicos de Islandia debido a la concentración de los mismos en fluidos geotérmicos, donde el incremento de la concentración está en relación directa con el incremento de temperatura esto debido a la lixiviación y partición de las rocas con alto contenido en Na y K (Kaasalainen, et al., 2015). Es de observarse que en el primer diagrama (figura 33-a) en las rocas alteradas de basalto-andesita el Ba se presenta relativamente móvil durante la interacción agua-roca a diferencia de las otras dos unidades, este comportamiento es típico en las rocas de composición basálticas (Arnórsson & Andrésdóttir, 1995), haciendo del Ba un buen indicador de los procesos de lixiviación.

VII.IV.II.III Diagramas normalizados de REE

El grupo de elementos traza que representa un gran uso en las ciencias geológicas son los denominados elementos de tierras raras (**REE, Rare Earth Elements**). Este consta de 15 elementos que tienen números atómicos que van de 57 (Lantano) a 71 (Lutecio), 14 de ellos ocurren en forma natural (Hanson, 1980). Las REE son divididas de acuerdo a su número atómico, las REE ligeras (LREE) corresponden a las de menor número atómico, y REE pesada (HREE) tienen un número atómico mayor (Pirajno, 2009). Se muestran los resultados obtenidos en la siguiente tabla:

Tabla 13. Composición de elementos de tierra raras (REE) de las 12 muestras de roca alterada de superficie.

Muestras	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$												
EG-01	20.75	40.10	5.32	22.51	5.32	1.45	4.96	0.77	4.63	0.96	2.62	2.69	0.41
EG-02	14.63	24.74	2.93	11.02	2.09	0.55	2.01	0.29	1.72	0.37	0.95	0.92	0.14
EG-03	3.77	6.55	0.67	2.76	0.47	0.15	0.50	0.07	0.46	0.11	0.28	0.27	0.05
EG-04	27.20	52.41	5.58	19.50	3.90	0.81	3.71	0.60	3.83	0.85	2.38	2.77	0.43
EG-05	40.78	73.71	8.34	29.08	5.82	1.06	5.35	0.84	5.34	1.16	3.21	3.72	0.58
EG-06	34.66	66.50	7.51	26.63	5.40	1.05	5.00	0.77	4.85	1.03	2.85	3.21	0.49
EG-07	12.25	19.25	2.31	9.56	2.25	0.54	1.71	0.23	1.16	0.21	0.45	0.30	0.05
EG-08	33.16	63.17	7.71	28.71	5.85	1.44	5.19	0.75	4.40	0.89	2.31	2.30	0.34
EG-09	28.84	57.10	7.80	32.05	5.04	0.89	2.86	0.37	1.60	0.29	0.79	0.65	0.10
EG-10	30.07	54.80	6.02	19.41	3.13	0.61	2.90	0.44	2.54	0.53	1.36	1.37	0.21
EG-11	32.04	58.92	7.29	26.88	5.23	1.33	4.60	0.68	3.97	0.82	2.21	2.31	0.35
EG-12	28.80	48.32	5.61	19.25	3.54	0.73	3.15	0.48	2.96	0.67	1.82	2.08	0.34
EG-13	8.58	21.89	3.11	14.39	3.87	1.31	4.30	0.70	4.48	0.92	2.49	2.38	0.35
EG-14	25.71	53.33	6.64	26.50	5.96	1.68	5.32	0.84	4.76	0.95	2.68	2.44	0.37
EG-15	25.43	48.36	6.19	24.23	5.17	1.35	4.99	0.75	4.47	0.93	2.45	2.41	0.36

Los resultados de las 3 muestras de rocas inalteradas correspondientes al mismo tipo de roca y evento volcánico de las 12 muestras de superficie alteradas se normalizaron con respecto a los valores de condrita de Sun y McDonough (1989). Estos son considerados material primitivo del sistema solar que pueden ser comparados con la abundancia original de REE en la tierra, la normalización se consideró para identificar procesos de fraccionamiento de estos elementos (Rollinson, 1993). El diagrama esta expresado en escala logarítmica en base diez, donde se graficó la concentración normalizadas vs el número atómico (Figura 34 a, b y c).

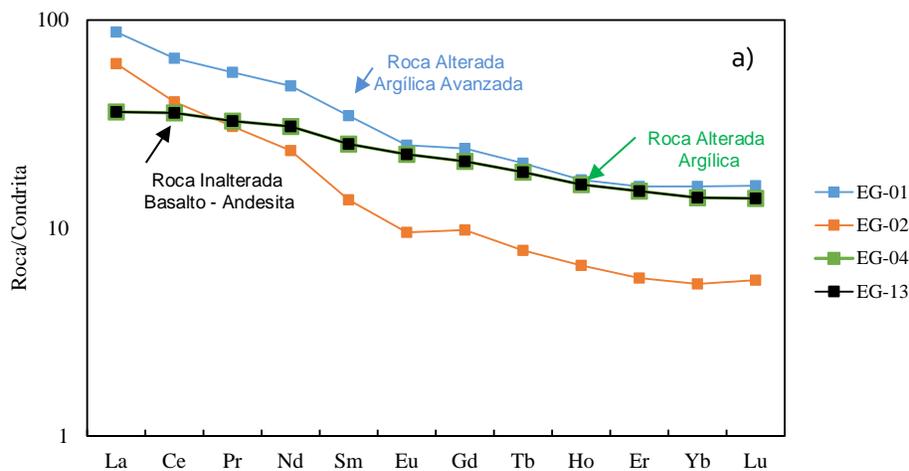


Figura 34-a. Diagrama de REE normalizados a condrita de las muestras alteradas (líneas de color) con respecto a su roca inalterada (línea negra) del CGLH (Sun y McDonough, 1989).

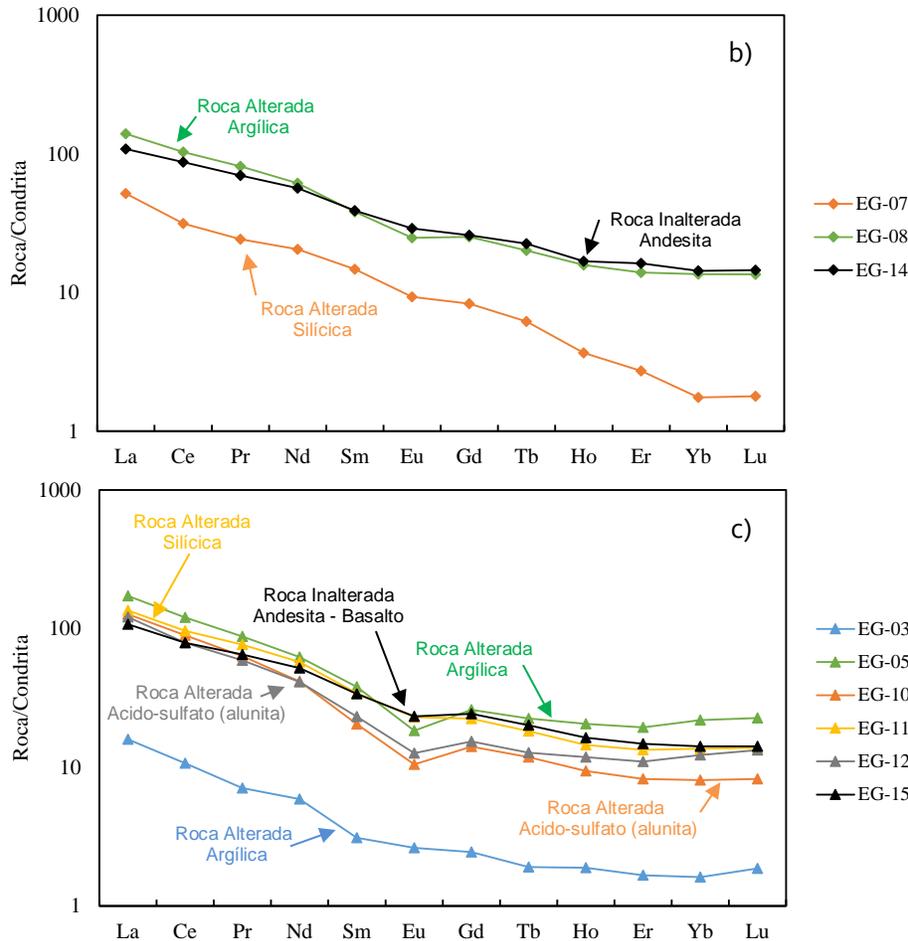


Figura 34-b y c. Diagrama de REE normalizados a condrita de las muestras alteradas (líneas de color) con respecto a su roca inalterada (línea negra) del CGLH (Sun y McDonough, 1989).

El diagrama normalizado de REE en las 12 muestras alteradas presenta patrones similares con respecto a las rocas inalteradas con enriquecimiento en LREE, empobrecimiento en HREE y una evidente anomalía de Eu, el cual está asociado al fraccionamiento de plagioclasas o feldespato alcalino (Rollinson, 1993) en rocas inalteradas sin embargo en rocas alteradas esta anomalía es aún más pronunciada (figura 34-c), esta movilidad del Eu es debido a las condiciones de redox en el sistema, donde una anomalía menor al patrón de referencia (roca inalterada) significaría condiciones hidrotermales oxidantes y baja temperatura por lo contrario y como se muestra en los resultados un patrón mayormente empobrecido al de la roca cogenética inalterada indica ambientes calientes y reducidos (Michard et al., 1983; Parr, 1992). Para EG-03 y 07 se muestra un patrón mayormente empobrecido con respecto a sus rocas cogenéticas, mientras que las muestras que presentan alteración argílica avanzada EG-02, 10 y 12 evidencian un empobrecimiento a partir del elemento Pr. Las muestras EG-01, 08, 05 y 11 presentan enriquecimiento con respecto a su roca cogenética de La, Ce, Pr, Nd y Sm.

La diferencia entre los patrones de REE en rocas cogenéticas alteradas e inalteradas ha sido estudiada en diferentes litologías de yacimientos minerales, cuya distribución en la roca o mineral está íntimamente

relacionada con el ambiente de formación y el grado de interacción agua-roca, transporte y depositación (Fleischer, 1978; Hanson, 1980; Smith, 2000). Se ha demostrado que en estadios avanzados de alteración, de propilítica a filica, las REE son empobrecidas debido a una constante lixiviación por la disminución del pH (incremento del ion H⁺), y al aumento de la intensidad de la interacción agua-roca provocando un decremento más pronunciado en las LREE que para HREE (Taylor y Fryer, 1982, 1983); siendo esto congruente con los resultados obtenidos para las muestras EG-02, 03 y 07, sin embargo estas observaciones no son consistentes con los resultados obtenidos para las muestras EG-01, 02, 08, 10, 11 y 12 que presentan mayor grado de alteración argílica – argílica avanzada, las cuales están mayormente empobrecidas en HREE y muestran enriquecimiento en LREE con respecto a las rocas inalteradas cogenéticas, lo cual implicaría que existe un proceso diferente a lo anteriormente visualizado por Taylor y Fryer (1982, 1983).

Mediante el análisis geoquímicos de fluidos en diferentes campos geotérmicos (Italia, Dominica, Caldera Valles, Mar de Salton) se ha podido determinar que el proceso por el cual se tiene enriquecimiento en LREE y empobrecimiento en HREE en estadios avanzados de la alteración podría deberse al contenido de REE en los fluidos geotérmicos, los cuales tienden a aumentar con la disminución del pH (incremento ion del H⁺), y la presencia de aguas cloruradas (Michard, 1989), estos posteriormente precipitan desde las soluciones acuosas en la química de los cristales de alteración (Lottermoser, 1992; Moller, 1998) o son integradas en la química de los minerales mediante procesos de sorción en la superficie del mismo (Bau, 1991) donde las REE con mayor movilidad son el La y Ce bajo complejos fluorurados o clorurados bajo temperaturas > 200 °C (Haas *et al.*, 1995). El proceso anteriormente mencionado es muy probable que esté ocurriendo en las muestras EG-01, 02, 08, 10, 11 y 12 las cuales presentan un mayor grado de alteración argílica – argílica avanzada ya que muestra congruencia con los resultados obtenidos.

VII.V Fluorescencia de Rayos X (ED-FRX)

Los resultados obtenidos para las muestras regionales y locales se muestran en las Tablas 14 y 15 mientras el resto de los resultados pueden ser consultados en el **Anexo III**. Se presentan tanto las rocas regionales y locales identificadas con la siguiente nomenclatura: L-1 a 69 y LL1-323 respectivamente para cada tipo de muestra. Los elementos en azul corresponden a los elementos mayores expresados en porcentaje en peso (%), y en negro se presentan los elementos menores y traza en partes por millón (µg/g), en sombreado gris los resultados de las muestras cogenéticas que no presentan alteración, estas últimas permitirán cuantificar la transferencia de masa relacionada con la circulación de fluidos hidrotermales.

Tabla 14. Análisis por FRX-ED de las muestras regionales del CGH.

Ba_Oliv: Basalto Olivino; Ba_And_Esc: escoria volcánica de Basalto – Andesita; Ba-And: Basalto – Andesita. El Hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Litología
	%										μg.g ⁻¹														
L7-7	50.05	1.55	15.43	10.85	0.16	3.97	7.77	0.55	0.22	43.14	347.00	174.91	2.73	163.22	327.19	76.99	80.79	0.11	7.24	958.16	13.96	5.50			Ba_Oliv.
L7-8	42.54	1.49	19.17	11.21	0.18	7.19	9.30	0.17	0.14	7.02	375.05	162.99	3.67	178.77	330.05	65.10	91.02	0.11		857.20	5.79	4.20			Ba_Oliv.
L8-8	41.81	1.54	18.13	10.23	0.16	5.97	8.19	0.46	0.26	20.29	352.30	172.46	4.12	161.51	275.76	47.12	84.91	0.11	2.43	1429.53	6.62				Ba_Oliv.
L8-9	42.28	1.34	17.24	10.81	0.15	3.40	7.86	0.53	0.18	23.45	340.70	159.11	0.67	139.63	339.55	64.13	82.46	0.11	3.65	1964.12	5.06	4.45			Ba_Oliv.
L8-10	45.61	1.43	18.79	10.89	0.16	6.23	8.72	0.51	0.14	22.43	369.56	170.58	4.86	159.35	338.31	74.90	80.93	0.11	5.62	1709.36	4.94	3.13			Ba_Oliv.
L9-7	40.50	1.55	19.74	11.01	0.18	5.93	8.81	0.36	0.25	17.08	373.29	179.18	5.24	177.51	298.80	70.73	95.43	0.11	4.59	915.99		3.59			Ba_Oliv.
L9-8	41.92	1.49	20.36	10.36	0.17	5.97	9.01	0.36	0.12	16.71	391.45	176.39	4.51	197.76	235.09	75.32	83.60	0.11	5.14	972.87		3.87			Ba_Oliv.
Ba_Oliv.	48.15	1.35	21.10	10.07	0.11	8.52	9.60	0.49	0.27	5.17	373.48	126.97	3.65	188.46	194.34	64.22	76.06	0.01	5.85	407.10	4.73	3.62	0.01	0.01	Ba_Oliv.
L9-1	43.18	1.50	11.97	8.24	0.13		5.06	1.64	0.25	98.19	408.47	263.84	13.92	141.97	41.16	31.85	86.01	0.11	8.87	303.43		4.63			Ba_And_Esc.
L9-2	48.22	1.77	13.61	8.89	0.14	3.60	5.46	1.78	0.22	98.68	424.61	274.25	15.60	140.84	51.38	42.97	88.28	3.96	11.07	329.21	4.18	6.97			Ba_And_Esc.
L9-3	46.88	1.71	13.93	8.83	0.14	1.11	5.39	1.57	0.29	94.89	422.08	273.44	15.21	159.56	63.83	46.00	91.45	4.03	8.80	455.70	4.68	8.63			Ba_And_Esc.
L9-4	48.76	1.66	13.73	8.88	0.13	3.44	5.40	1.74	0.20	96.14	413.53	268.28	14.46	168.36	62.60	52.76	90.01	4.63	10.69	383.78	3.99	7.87			Ba_And_Esc.
L9-5	48.45	1.78	13.84	9.03	0.14	1.12	5.38	1.61	0.24	88.22	422.11	280.68	14.56	138.12	58.82	23.03	105.60	0.11	9.83	0.00	4.88	7.84			Ba_And_Esc.
L9-6	51.87	1.77	15.62	9.71	0.15	1.98	5.54	1.81	0.25	100.75	426.81	278.57	14.73	125.90	63.13	61.79	104.49	6.19	12.49	410.66	4.58	9.93	5.28		Ba_And_Esc.
L8-5	49.15	1.58	14.18	8.39	0.14		5.17	1.71	0.26	104.43	428.75	282.82	14.97	151.39	19.64	28.49	99.60	4.38	8.38	1509.04	4.81	3.29			Ba_And_Esc.
L7-5	41.68	0.85	10.55	4.29	0.08		1.86	2.43	0.11	163.22	208.56	364.23	17.58	31.79	17.02	15.67	56.04	10.80	14.00	881.01	3.42	3.63	9.61	7.54	Ba_And_Esc.
Ba_And_Esc.	59.03	1.53	18.25	7.94	0.08	3.66	5.48	2.23	0.39	46.44	418.58	246.47	15.04	157.35	20.01	28.07	76.70	2.97	12.04	0.01	0.01	5.55	0.01	0.01	Ba_And_Esc.
L1-1	54.28	1.34	14.44	6.29	0.10	1.62	4.78	1.96	0.10	114.23	432.39	223.23	7.00	108.50	28.32	29.23	70.79	4.26	13.09	807.54		4.22			Ba_And.
L1-4	54.09	1.33	14.85	6.52	0.11	2.30	4.80	1.98	0.14	125.66	448.19	233.19	10.44	112.65	32.91	28.22	81.13	6.92	15.70	850.88		3.75	5.00		Ba_And.
L2-2	52.78	1.21	14.49	6.18	0.12	1.40	5.72	1.81	0.33	107.66	480.96	238.75	10.88	77.78	34.83	23.77	77.94	4.84	8.20	1170.62	3.70		4.29		Ba_And.
L2-3	51.02	1.37	13.31	6.63	0.11	1.03	4.72	1.89	0.13	119.77	456.09	238.93	12.26	101.16	22.38	36.27	70.67	5.23	13.20	867.85		3.86			Ba_And.
L2-5	47.71	1.73	9.05	7.48	0.09		2.80	2.13	0.57	134.73	482.67	295.32	19.75	96.08		2.57	89.58	2.95	10.15	15599.55	4.55				Ba_And.
L2-6	47.17	1.34	11.39	6.44	0.11		4.31	1.88	0.14	114.14	437.79	231.40	11.11	100.18		21.48	81.30	5.22	9.81	335.79					Ba_And.
L3-1	56.19	1.22	14.05	5.72	0.11		4.36	2.13	0.44	138.81	407.79	262.70	12.02	76.32	35.62	29.58	70.45	6.45	14.55	1034.37		4.22	4.84		Ba_And.
L3-3	49.18	1.36	12.63	6.48	0.10	1.03	4.51	1.87	0.14	121.49	432.88	234.58	11.30	96.94	20.34	19.67	75.94	5.50	10.20	327.36		2.62			Ba_And.
L3-5	41.48	1.26	10.31	6.66	0.11		4.04	1.89	0.12	123.70	424.54	245.11	11.63	91.53	15.46	26.35	80.22	7.21	9.80	862.38	4.02	3.77	4.55		Ba_And.
L3-6	48.26	1.25	12.29	6.19	0.11	0.89	4.04	1.80	0.22	118.29	411.40	239.79	10.99	103.34	34.15	30.05	81.87	5.67	12.94	800.11			4.06		Ba_And.
L4-1	54.34	1.41	15.75	6.71	0.11	2.19	4.99	1.88	0.38	113.27	444.67	231.74	9.49	114.13	31.20	23.94	74.93	5.32	10.55	882.87		3.63	3.63		Ba_And.
L5-4	48.24	1.35	13.53	6.80	0.11	1.33	4.09	1.49	0.24	104.34	442.21	232.23	11.04	113.56	23.57	24.75	89.62	5.95	13.94	1060.01	8.85	4.44	4.71		Ba_And.
L6-1	50.43	1.31	14.32	6.70	0.12	1.45	5.34	1.80	0.10	111.33	462.11	253.05	11.71	93.40	33.48	36.38	74.28	6.08	15.54	369.59	4.16	4.07	4.49		Ba_And.
L7-1	54.50	0.77	10.84	4.93	0.11		4.35	2.86	1.77	86.50	300.90	365.40	18.63	33.44	46.50	26.94	95.38	10.15	19.04	2666.94	4.77	8.61	8.41	7.97	Ba_And.
L7-3	62.15	0.77	14.13	7.82	0.10		2.38	3.07	0.17	81.32	246.36	354.29	17.34	28.05	86.40	85.17	70.60	10.86	13.68	1072.70	7.05	17.83	9.34	9.76	Ba_And.
L8-1	62.42	0.89	15.47	7.20	0.12		2.95	2.99	0.32	79.03	305.03	360.60	20.17	44.79	71.48	52.84	81.78	9.51	16.84	1397.54	7.93	15.48	8.92	5.89	Ba_And.
L8-2	60.83	0.97	15.21	7.32	0.13		3.29	2.87	0.38	73.45	341.03	341.58	18.44	45.29	83.59	53.75	76.35	10.56	15.93	1483.75	7.26	14.39	9.77	5.45	Ba_And.
L8-3	60.02	0.93	14.94	7.14	0.11		2.99	2.77	0.22	73.21	311.49	349.66	19.32	53.22	88.21	49.38	67.71	9.53	16.74	1342.70	7.57	15.41	6.57		Ba_And.
Ba_And.	56.14	1.30	18.19	7.45	0.08	4.10	6.37	1.76	0.31	39.99	449.00	214.32	12.83	140.78	28.33	32.31	76.13	0.00	11.61	0.01	4.42	5.31	0.01	0.01	Ba_And.

Tabla 15. Análisis por FRX-ED de las muestras Locales del CGH.
 And: andesita; Ba_Olvi: Basalto de olivino. El Hierro total viene expresado como Fe₂O₃

Muestra	%										µg.g ⁻¹										Roca					
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb		S	As	Mo	Bi	U
LL4-22	49.00	1.48	14.59	7.79	0.13	1.94	6.48	1.69	0.14	94.58	470.89	819.97	245.36	12.03	142.90	90.30	32.25	91.15	3.28	11.05	855.91	5.09	4.86			And.
LL4-26	49.13	1.89	14.91	9.12	0.15	1.74	6.23	1.58	0.23	77.10	429.55	869.24	277.63	17.21	171.65	80.46	27.13	105.70	0.11	8.92	404.07		4.70			And.
LL4-15	43.54	0.95	11.78	5.46	0.11	0.61	3.77	1.56	0.05	120.59	394.40	794.01	248.79	9.11	64.24	74.82	29.08	54.66	6.81	10.27	1100.56		4.50	6.51		And.
LL4-29	57.12	1.20	14.96	5.68	0.11	0.84	4.16	2.07	0.31	105.80	334.34	685.41	333.43	16.03	74.06	37.69		79.27	7.56	12.08		4.27		5.78		And.
LL4-31	66.35	0.57	12.83	2.98	0.08		2.16	3.52	0.06	98.66	186.49	801.38	358.86	15.49	16.36	0.62		44.01	13.98	16.08	325.17	3.79	3.10	12.41	10.39	And.
LL4-34	64.38	0.56	10.62	2.61	0.07		1.20	4.28	0.06	124.95	99.55		367.98	18.31	2.22			36.39	19.85	17.71		5.88	8.12	18.86	12.98	And.
LL4-24	50.93	1.37	15.31	6.81	0.12	1.16	4.23	1.71	0.27	105.49	323.08		290.93	12.53	97.20	45.17	0.33	74.55	6.17	6.92	219.83	5.41	3.29	4.29		And.
LL4-25	54.57	1.69	15.15	7.71	0.13	1.39	5.15	1.75	0.35	93.14	440.93	705.24	256.50	14.02	158.55	46.15	31.56	85.27	3.82	9.91	287.34		5.08			And.
LL4-30	71.75	0.63	11.59	3.02	0.07		1.45	2.87	0.12	186.55	137.43		358.52	15.29	6.00	12.53		26.09	13.88	7.96	118.26	3.96	2.95	13.55	7.19	And.
LL_And	57.22	1.21	14.10	6.06	0.10		4.17	2.62	0.21	151.63	328.28	639.39	322.95	13.78	79.34	32.90		72.37	7.80	12.29	190.13		4.84	6.69		And.
LL18-29	51.40	1.50	15.01	9.02	0.13	2.84	7.12	0.59	0.25	30.40	329.45		184.12	5.00	144.33	261.05	33.96	79.44	0.11	3.02	1287.83	4.61	3.47			Ba_Olvi
LL10-10	51.36	1.37	15.29	7.27	0.12		5.74	1.75	0.06	92.88	452.74	686.16	246.51	11.63	128.90	46.94	43.60	72.17	4.80	8.94	175.98		7.79	4.12		Ba_Olvi
LL10-23	51.91	1.50	15.84	7.40	0.12	1.55	5.47	1.59	0.60	82.87	423.12	426.69	242.61	10.45	132.28	64.33	39.09	90.03	0.11	8.43	560.81	4.58	3.71			Ba_Olvi
LL11-7	54.22	1.49	17.10	7.52	0.13	1.06	5.71	1.64	0.17	104.27	446.09	980.44	261.10	13.01	110.71	39.11	37.18	78.67	4.20	7.55	398.71	6.46	4.23			Ba_Olvi
LL11-9	49.24	1.52	15.54	7.65	0.15	1.44	5.63	1.43	0.27	84.40	422.76	539.65	260.89	11.36	104.31	50.46	39.57	100.43	4.49	8.60			3.88			Ba_Olvi
LL11-11	49.49	1.44	14.64	7.47	0.13		5.63	1.63	0.09	97.24	446.41	608.30	252.30	12.15	122.80	37.26	38.04	87.27	3.68	9.99	396.63	8.53	6.54			Ba_Olvi
LL11-12	49.32	1.42	15.14	7.23	0.11		5.65	1.47	0.18	86.08	427.35	535.53	251.33	10.93	134.65	44.09	28.81	78.82	4.30	7.67	0.00	6.85	2.91			Ba_Olvi
LL11-13	54.38	1.04	14.05	4.62	0.08		3.49	2.20	0.29	135.51	445.99		262.70	12.58	66.28	61.04	0.17	56.91	9.05	11.84	9087.05	8.96	5.17	8.50		Ba_Olvi
LL11-23	49.80	1.45	13.28	6.90	0.14	1.97	5.33	1.30	0.29	85.02	396.62		225.82	9.12	126.77	38.74	28.88	105.15	0.11	9.28	1252.26		2.79			Ba_Olvi
LL11-25	53.71	1.60	12.17	6.52	0.10		4.42	1.48	0.44	77.69	423.18	600.27	244.86	10.12	94.55	37.49	26.75	66.21	2.69	12.67	3760.48		5.39			Ba_Olvi
LL12-24	60.57	2.10	9.63	5.05	0.07		2.56	1.47	0.35	77.40	487.43	915.54	279.39	13.18	95.60	26.66	32.08	59.38	2.76	12.93	13918.64		4.22			Ba_Olvi
LL12-26	67.82	1.96	6.64	3.41	0.06		1.17	1.27	0.22	87.25	210.03		331.79	15.12	109.51			31.30	4.32	14.39	8452.21	8.69	3.91			Ba_Olvi
LL13-16	50.04	1.67	16.52	8.91	0.14	2.85	5.63	1.59	0.27	90.48	454.05	1503.26	269.34	15.81	171.87	96.95	51.88	105.63	3.81	12.50	711.99	6.96	7.91			Ba_Olvi
LL13-17	51.62	1.44	13.20	8.77	0.14		5.30	1.54	0.18	95.76	409.25	835.27	224.11	9.70	158.44	77.35	46.06	88.10	0.11	5.78	1905.17		3.23			Ba_Olvi
LL13-18	49.13	1.58	12.46	7.57	0.13	0.97	5.04	1.11	0.20	44.49	399.63	699.73	222.11	8.96	127.30	53.87	33.30	79.21	2.77	7.99	743.13		2.71			Ba_Olvi
LL13-19	56.22	1.40	11.99	6.52	0.11		4.24	1.29	0.17	90.29	387.66	940.24	241.70	13.41	82.10	53.42	22.17	68.46	2.89	7.73	1553.84	4.64	2.93			Ba_Olvi
LL13-23	48.87	1.73	14.81	9.26	0.08		3.40	1.34	0.17	55.35	432.40	515.23	238.76	10.28	145.08	59.67	38.47	56.89	0.11	7.58	20718.73		4.08			Ba_Olvi
LL13-25	50.80	1.59	14.53	6.93	0.11		5.30	1.75	0.17	105.11	437.72	887.62	268.58	14.61	111.29	43.27	33.78	89.37	3.26	9.13	5682.04		5.21			Ba_Olvi
LL14-12	53.94	1.38	14.29	6.67	0.12		7.74	1.52	0.16	74.34	460.65	782.94	224.85	9.80	98.73	41.45	32.42	73.50	0.11	7.20	1020.07					Ba_Olvi
LL15-16	49.29	1.45	13.50	8.60	0.14		4.50	1.58	0.19	78.77	401.73	607.38	222.20	9.64	156.98	49.92	40.89	91.37	2.91	8.76	7858.31	7.01	3.38			Ba_Olvi
LL15-17	50.55	1.68	14.45	8.01	0.12		5.28	1.17	0.26	50.85	409.80	597.85	244.29	10.18	153.29	68.08	38.45	88.23	0.11	9.89	439.71		4.12			Ba_Olvi
LL15-18	49.45	1.64	15.06	7.83	0.13		5.94	1.26	0.20	46.49	458.74	971.63	250.51	11.62	138.01	69.27	34.88	84.30	3.12	11.19	708.62		2.60			Ba_Olvi
LL15-19	47.01	1.47	13.96	7.62	0.12		6.01	1.79	0.15	75.83	454.19	647.73	245.88	11.17	104.19	34.01	42.60	80.96	0.11	11.29	196.41		5.94			Ba_Olvi
LL15-20	49.74	1.61	14.07	6.40	0.09	1.23	4.51	1.61	0.22	101.74	444.13	527.10	242.03	12.23	106.78	46.23	29.58	68.93	3.03	9.50	13746.60					Ba_Olvi
LL16-17	48.82	1.76	14.70	8.23	0.12	1.37	5.22	1.47	0.16	56.36	447.00	786.88	266.13	14.35	120.44	67.44	48.05	90.61	3.23	8.76	1307.77	5.30	6.77			Ba_Olvi
Ba_Olv	48.15	1.35	21.10	10.07	0.11	8.52	9.60	0.49	0.27	5.17	373.48	422.17	126.97	3.65	188.46	194.34	64.22	76.06		5.85	407.10	4.73	3.62			Ba_Olvi

VII.V.I Determinación de la Movilidad Elemental Mediante la Ecuación de Grant (1986)

Diversos autores consideraron algunos elementos como inmóviles durante la alteración hidrotermal, tal es el caso del Ti en vidrio volcánico (Dickin, 1981), el Zr en basaltos oceánicos (Humphis y Thompson, 1978), Al_2O_3 en granitos (O'Hara, 1990), etc., motivo por el cual autores como Pearce y Cann (1973); Winchester y Floyd (1977) han utilizado el Zr para la clasificar el ambiente tectónico, o en la clasificación de rocas ígneas que han sufrido hidrotermalismo o han sido metamorfoseadas. Browne y colaboradores (1992) además de considerar al Zr y Ti, además agregan otros elementos como el V y P a la lista de elementos inmóviles bajo la acción de fluidos hidrotermales. Pese a lo anterior se ha reportado que en rocas volcánicas, riolitas peralcalinas los elementos Zr y Ti pueden ser altamente móviles (Rubin *et al.*, 1993; Kelepertsis & Esson, 1987). Debido a la movilidad elemental que se discutió anteriormente hacer uso de un método para el balance de masas donde previamente se establece que elementos deben considerarse inmóviles (Barret & MacLean, 1991), este resultaría muy poco representativo en un ambiente donde la interacción agua-roca es intensa (índices de alteración IQA >80 que se refleja en alteración argílica avanzada) y podría conducir a errores de interpretación. Por lo expuesto anteriormente se optó para el presente estudio usar el método de isocona de Grant (1986) el cual no establece previamente que elementos son inmóviles, y se puede elegir ya sea por medios estadísticos o gráficos los elementos inmóviles, permitiendo así una mejor interpretación de los datos.

Para determinar el enriquecimiento o empobrecimiento elemental ocasionada por la interacción de los fluidos hidrotermales con la litología superficial del CGH, se utilizó la ecuación para el balance de masas de Gresens' (1967) para la alteración metasomática, la cual fue modificada por Grant (1986) para proporcionar una solución simple llamada diagrama de isocona la cual consiste mediante el uso de un gráfico binario en donde se presenta la concentración de los elementos químicos de la roca inalterada, vs la concentración de los elementos de la roca alterada, y mediante una regresión lineal que conecte a los elementos químicos que no han sufrido un cambio de masa o volumen se obtiene la línea recta llamada isocona, en donde los elementos que estén por encima de la isocona son los que han sufrido enriquecimiento y los que estén por debajo de esta serán los que hayan sido empobrecidos durante la alteración hidrotermal (Izaguirre, 2012). Así este método nos proporciona un medio sencillo y eficaz de estimar cuantitativamente los cambios de masas (**M**) o volumen (**V**) y/o concentraciones durante el proceso de alteración hidrotermal (Grant, 1986; 2005), este será aplicado al campo geotérmico Los Humeros, para determinar la movilidad elemental, y al final del análisis poder determinar si existe una

relación directa con las zonas productoras del CGH y estos puedan ser usados como minerales índice en la exploración geotérmica.

La gran ventaja de este método es que no se necesita establecer previamente que elementos deben considerarse inmóviles, que a diferencia de otros métodos utilizados como los descritos por Barret y MacLean en 1991 o Barret en 1992, en los cuales la problemática reside en que hay que establecer, a priori, los elementos que deben considerarse inmóviles (Bustillo, y Bustillo, M., 1999).

Mediante el uso de la ecuación de Grant (1986), ver ecuación (6), se realizó el balance de masas a cada una de las 392 muestras (69 regionales y 323 locales) mediante la hoja de cálculo EASYGRESGRANT esta se cuantifica mediante la ecuación de Grant (1986) los cambios de volumen y masa para llevar a cabo el modelado de balance de masas en sistemas metasomático (López-Moro, 2012). EASYGRESGRANT permite a diferencia de otros programas de balance de masas (Potdevin, 1993; Coelho, 2006), graficar la isocona a partir de herramientas de análisis estadísticas y graficas (ver **Anexo IV**) que ayudan a determinar los elementos inmóviles, el programa también proporciona una solución sutil al problema de escalar arbitrariamente los elementos mayores y traza en un mismo grafico el cual influía al ajuste de la isocona, conduciendo a errores en los cálculos de balance de masas (Mukherjee and Gupta, 2008).

El cálculo de balance de masas se llevó a cabo en las 69 muestras regionales y 323 muestras locales, parte de los resultados se muestran en las Tablas 16-17 mientras que el resto de los resultados esta contenidos en el **Anexo V**, en las tablas las rocas regionales están identificadas con la nomenclatura L-1-69 y las muestras locales con la nomenclatura de LL-1-323, en azul se tienen los elementos mayores en porcentaje en peso (%) y en negro los elementos menores y traza en partes por millón ($\mu\text{g/g}$), los elementos inmóviles para cada una de las litologías estan en sombreado azul.

Tabla 16. Resultados del Balance de Masas de las muestras regionales del CGH.
 Ba_Oliv: Basalto Olivino; Ba_And_Esc: escoria volcánica de Basalto – Andesita; Ba-And: Basalto – Andesita. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca	
	Norte	Este																											
L7-7	2176035	661026	-1.04	0.11	-6.58	0.14	0.04	-4.79	-2.28	0.03	-0.06	35.44	-46.85	-54.32	37.68	-1.08	-34.82	113.64	8.25	-0.02	0.10	0.96	494.81	8.41	1.56				Ba_Oliv.
L7-8	2177038	661009	-12.56	-0.10	-5.06	-0.69	0.03	-2.51	-1.81	-0.35	-0.16	0.71	-59.68	-161.04	9.40	-0.58	-38.89	81.80	-9.75	0.09	0.09		310.09	0.11	-0.11				Ba_Oliv.
L8-8	2177075	660023	-10.63	0.04	-4.84	-0.89	0.03	-3.17	-2.25	-0.08	-0.04	13.03	-57.39	-246.60	27.76	0.05	-43.55	53.07	-21.94	0.12	0.10	-3.67	875.49	1.21					Ba_Oliv.
L8-9	2178066	660098	-9.14	-0.11	-5.20	-0.10	0.02	-5.39	-2.34	-0.01	-0.11	16.46	-59.15		19.82	-3.03	-59.64	118.92	-5.05	0.01	0.10	-2.49	1404.98	-0.06	0.49				Ba_Oliv.
L8-10	2179019	660066	-5.30	-0.01	-3.45	0.16	0.04	-2.67	-1.40	-0.01	-0.14	15.91	-26.24	-204.22	33.30	0.91	-38.74	123.52	6.15	-0.02	0.10	-0.57	1198.97	-0.09	-0.68				Ba_Oliv.
L9-7	2176023	659030	-15.79	-0.11	-5.33	-1.28	0.03	-3.79	-2.56	-0.21	-0.07	8.48	-75.27	28.31	16.17	0.54	-46.65	44.36	-7.71	0.17	0.08	-2.18	324.65		-0.75				Ba_Oliv.
L9-8	2177071	659047	-9.97	0.00	-2.56	-0.64	0.04	-3.08	-1.39	-0.17	-0.17	10.05	-16.92	-77.03	33.70	0.45	-8.33	19.79	4.39	0.08	0.10	-1.17	479.06		-0.09				Ba_Oliv.
L9-1	2170092	659074	-18.70	-0.13	-7.07	-0.25	0.04		-0.75	-0.70	-0.16	45.28	-36.99	-218.59	0.01	-2.04	-24.72	18.45	1.68	3.65	-2.88	-3.75	283.46		-1.22				Ba_And_Esc.
L9-2	2171071	659052	-15.69	0.06	-6.02	0.05	0.04	-0.43	-0.57	-0.64	-0.19	42.25	-36.97	-185.70	0.00	-1.03	-30.77	26.17	10.55	2.64	0.59	-2.09	295.87	3.76	0.71				Ba_And_Esc.
L9-3	2172011	659054	-16.77	0.01	-5.69	0.02	0.05	-2.66	-0.61	-0.82	-0.13	39.09	-38.12	-138.12	0.00	-1.33	-13.52	37.53	13.39	5.74	0.66	-4.11	410.77	4.22	2.23				Ba_And_Esc.
L9-4	2173010	659014	-14.24	-0.01	-5.64	0.21	0.04	-0.50	-0.51	-0.63	-0.21	41.88	-38.67	-244.33	-0.01	-1.76	-2.68	37.51	20.40	5.99	1.28	-2.22	352.58	3.67	1.68				Ba_And_Esc.
L9-5	2174057	659034	-16.49	0.03	-6.09	-0.01	0.04	-2.68	-0.75	-0.82	-0.18	31.03	-47.92	-111.26	0.00	-2.26	-36.06	31.65	-7.85	16.03	-2.88	-3.41		4.29	1.33				Ba_And_Esc.
L9-6	2175087	659088	-13.14	0.03	-4.43	0.65	0.05	-1.92	-0.58	-0.63	-0.17	42.70	-40.98	-44.24	-0.02	-2.01	-45.96	35.85	26.59	15.74	2.50	-0.99	363.31	4.05	3.24	4.67			Ba_And_Esc.
L8-5	2174076	660066	-16.19	-0.15	-5.89	-0.63	0.04		-0.97	-0.75	-0.17	44.58	-44.91	78.27	0.02	-1.99	-25.40	-2.89	-3.24	10.11	0.84	-4.73	1315.20	4.19	-2.68				Ba_And_Esc.
L7-5	2174002	661061	-30.81	-0.96	-11.11	-5.04	-0.03		-4.22	-0.59	-0.31	64.08	-277.36		0.16	-3.14	-135.82	-8.48	-17.46	-38.75	4.34	-2.56	596.57	2.32	-3.09	6.51	5.11		Ba_And_Esc.
L1-1	2170035	667023	-4.03	-0.01	-4.33	-1.42	0.02	-2.54	-1.79	0.13	-0.21	69.68	-33.86	-760.52	0.00	-6.11	-36.61	-1.14	-4.24	-8.16	4.09	0.96	775.31		-1.26				Ba-And.
L1-4	2173012	667045	-6.43	-0.08	-4.55	-1.47	0.02	-1.99	-1.96	0.07	-0.18	75.50	-37.08	-349.29	0.00	-3.24	-37.24	1.92	-6.37	-1.56	6.36	2.82	782.04		-1.86	4.60			Ba-And.
L2-2	2171045	666070	-8.76	-0.21	-5.19	-1.90	0.02	-2.85	-1.24	-0.13	-0.02	56.65	-17.24	-477.04	0.00	-3.06	-70.95	2.94	-10.97	-6.16	4.34	-4.25	1050.87		-1.10	3.85			Ba-And.
L2-3	2172055	666077	-10.38	-0.07	-6.26	-1.50	0.02	-3.18	-2.14	-0.06	-0.20	67.44	-39.89	-437.57	0.00	-1.83	-50.03	-8.25	0.23	-12.73	4.69	0.23	778.46		-1.85				Ba-And.
L2-5	2174052	666024	-21.52	-0.04	-11.63	-2.02	-0.01		-4.34	-0.21	0.10	57.79	-98.71	-845.19	0.00	1.51	-71.05		-30.44	-11.12	2.14	-4.24	11321.08		-1.12				Ba-And.
L2-6	2175025	666083	-12.46	-0.06	-7.65	-1.49	0.02		-2.38	-0.01	-0.18	65.72	-43.52	-439.16	0.00	-2.54	-47.99		-12.42	-0.83	4.84	-2.52	311.01						Ba-And.
L3-1	2170035	665043	-10.30	-0.30	-6.73	-2.79	0.01		-2.82	-0.02	0.04	73.25	-116.32	-330.15	0.00	-3.02	-78.51	0.73	-8.18	-18.65	5.26	0.26	843.87		-1.87	3.95			Ba-And.
L3-3	2172067	665067	-11.21	-0.05	-6.65	-1.53	0.01	-3.17	-2.25	-0.04	-0.18	71.01	-53.50	-632.61	0.00	-2.50	-52.21	-9.75	-14.34	-6.74	5.02	-2.29	299.09		-2.92				Ba-And.
L3-5	2174086	665093	-19.87	-0.19	-9.18	-1.63	0.01		-2.84	-0.11	-0.21	68.17	-77.79	-550.70	0.00	-2.65	-60.75	-14.81	-9.27	-5.98	6.31	-3.04	754.05		-0.90	-2.01	3.98		Ba-And.
L3-6	2175020	665076	-13.01	-0.18	-7.20	-1.92	0.01	-3.31	-2.76	-0.15	-0.11	65.73	-81.29	-609.33	0.00	-3.00	-48.41	2.19	-5.44	-2.95	5.07	-0.04	715.14			3.63			Ba-And.
L4-1	2170001	664055	-5.88	0.00	-3.63	-1.24	0.02	-2.08	-1.76	-0.01	0.04	64.76	-37.75	-558.86	0.00	-4.05	-35.22	0.52	-10.16	-6.83	4.92	-1.85	816.51		-1.95	3.36			Ba-And.
L5-4	2173054	663028	-11.62	-0.05	-5.70	-1.17	0.02	-2.87	-2.60	-0.38	-0.10	56.30	-40.89	-361.43	0.00	-2.64	-35.97	-6.58	-9.46	6.58	5.49	1.25	978.27	3.75	-1.21	4.35			Ba-And.
L6-1	2170050	662007	-13.43	-0.19	-6.06	-1.78	0.02	-2.87	-1.85	-0.23	-0.23	54.30	-57.61	-473.69	0.00	-2.91	-61.67	0.02	-1.49	-13.21	5.15	1.56	313.03		-0.90	-1.86	3.80		Ba-And.
L7-1	2170048	661019	-24.18	-0.84	-11.83	-4.56	-0.02		-3.82	-0.08	0.73	10.74	-272.51	-651.91	0.00	-1.90	-121.16	-1.05	-16.51	-20.18	5.95	-0.44	1564.31		-1.62	-0.26	4.93	4.67	Ba-And.
L7-3	2172063	661037	-18.52	-0.83	-9.64	-2.72	-0.02		-4.93	0.10	-0.21	9.23	-299.87	-776.71	0.15	-2.33	-123.79	23.93	19.25	-33.39	6.57	-3.33	649.35		-0.15	5.48	5.65	5.91	Ba-And.
L8-1	2170061	660006	-19.04	-0.77	-9.00	-3.18	-0.01		-4.62	0.02	-0.12	6.98	-267.71	-649.90	0.00	-0.84	-114.15	14.16	-0.90	-27.52	5.65	-1.60	830.64	0.29	3.89	5.30	3.50		Ba-And.
L8-2	2171088	660010	-17.98	-0.69	-8.65	-2.86	0.00		-4.31	0.04	-0.07	6.09	-235.02	-634.64	0.00	-1.26	-112.36	24.12	1.42	-28.22	6.63	-1.61	930.98	0.14	3.72	6.13	3.42		Ba-And.
L8-3	2172087	660077	-19.35	-0.73	-9.03	-3.08	-0.01		-4.54	-0.06	-0.18	4.88	-258.07	-640.41	0.00	-0.98	-108.16	25.74	-2.04	-34.62	5.84	-1.34	823.02	0.22	4.14	4.03			Ba-And.

Tabla 17. Resultados del Balance de Masas de las muestras locales del CGH.
 And: andesita; Ba_Olvi: Basalto de olivino. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca	
	Norte	Este																											
LL4-22	2176706	662701	7.27	0.74	5.10	4.20	0.07	2.56	4.36	-0.41	-0.03	-27.14	291.52	439.88	0.00	2.06	108.74	85.96	42.45	47.60	-3.48	2.26	936.45	6.70	1.56				And.
LL4-26	2177105	662710	-0.07	0.99	3.24	4.56	0.08	2.03	3.07	-0.79	0.06	-61.94	171.40	371.75	0.00	6.25	120.33	60.69	31.56	50.58	-7.68	-1.92	279.90		0.63				And.
LL4-15	2176001	662708	-0.70	0.03	1.19	1.03	0.04	0.79	0.72	-0.60	-0.14	4.91	183.69	391.29	0.00	-1.95	4.05	64.23	37.74	-1.42	1.03	1.04	1238.47		1.00	1.76			And.
LL4-29	2177402	662704	-1.89	-0.04	0.38	-0.56	0.00	0.81	-0.15	-0.62	0.09	-49.15	-4.44	24.49	0.00	1.75	-7.60	3.60		4.41	-0.48	-0.59			4.13		-1.09		And.
LL4-31	2177605	662704	2.49	-0.70	-2.56	-3.38	-0.03		-2.23	0.55	-0.16	-62.84	-160.44	81.81	0.00	0.16	-64.62	-32.34		-32.77	4.78	2.18	102.51	3.41	-2.05	4.48	9.35		And.
LL4-34	2177905	662703	-0.72	-0.71	-4.78	-3.77	-0.04		-3.12	1.13	-0.15	-41.96	-240.91		0.00	2.30	-77.40			-40.44	9.62	3.25			5.16	2.29	9.86	11.39	And.
LL4-24	2176903	662705	-0.69	0.31	2.89	1.50	0.03	1.28	0.52	-0.73	0.09	-34.53	30.36		0.00	0.13	28.56	17.24	0.37	10.38	-0.96	-4.61	53.89	6.00	-1.19	-1.93			And.
LL4-25	2177009	662705	11.48	0.92	4.97	3.66	0.06	1.75	2.31	-0.42	0.23	-34.35	226.87	248.54	0.00	3.87	120.28	25.20	39.73	34.99	-2.99	0.19	171.64		1.56				And.
LL4-30	2177507	662702	7.41	-0.64	-3.66	-3.33	-0.03		-2.86	-0.04	-0.10	16.41	-204.48		0.00	0.00	-73.94	-21.62		-48.87	4.70	-5.12	-83.60	3.57	-2.18	5.52	6.48		And.
LL18-29	2177405	661309	1.07	0.09	-6.73	-1.44	0.01	-5.80	-2.78	0.07	-0.03	23.94	-58.04		49.32	1.14	-50.27	55.60	-31.70	0.00	0.10	-2.96	825.96	-0.32	-0.30				Ba_Olv.
LL10-10	2175502	662109	5.97	0.10	-4.99	-2.41	0.01		-3.55	1.35	-0.21	92.72	103.64	300.93	132.82	8.61	-52.62	-144.87	-18.26	0.00	5.05	3.57	-221.64		4.59	4.34			Ba_Olv.
LL10-23	2176804	662108	-4.30	-0.09	-7.72	-3.82	-0.01	-7.21	-4.97	0.85	0.24	64.85	-16.00	-61.68	78.01	5.18	-76.70	-139.99	-31.19	0.00	0.09	1.27	66.71	-0.86	-0.49				Ba_Olv.
LL11-7	2175205	662005	4.28	0.09	-4.56	-2.80	0.01	-7.50	-4.08	1.09	-0.11	95.64	57.83	525.76	125.48	8.93	-81.42	-156.53	-28.27	0.00	4.06	1.44	-21.61	1.52	0.47				Ba_Olv.
LL11-9	2175404	662004	-10.85	-0.20	-9.33	-4.28	0.00	-7.44	-5.33	0.59	-0.07	58.76	-53.27	-13.44	70.63	4.95	-109.46	-156.13	-34.24	0.00	3.40	0.66			-0.68				Ba_Olv.
LL11-11	2175604	662008	-5.02	-0.09	-8.34	-3.56	0.00		-4.69	0.93	-0.20	79.59	15.62	108.04	92.94	6.93	-81.42	-161.87	-31.06	0.00	3.21	2.85	-61.39	2.70	2.08				Ba_Olv.
LL11-12	2175703	662007	-0.56	0.02	-6.49	-3.09	0.00		-4.14	0.93	-0.10	77.90	38.94	94.64	115.58	6.90	-58.52	-151.79	-36.42	0.00	4.15	1.55			1.88	-0.81			Ba_Olv.
LL11-13	2175809	662003	24.53	0.04	-2.32	-3.90	-0.01		-4.93	2.44	0.12	175.94	222.60		224.13	13.16	-99.88	-112.77	-63.98	0.00	12.09	9.97	11737.94	7.25	3.29	11.36			Ba_Olv.
LL11-23	2176810	662004	-12.12	-0.30	-11.49	-5.08	-0.01	-7.10	-5.74	0.45	-0.07	56.33	-86.55		36.40	2.95	-96.75	-166.32	-43.32	0.01	0.08	0.86	498.82		-1.60				Ba_Olv.
LL11-25	2177009	662009	13.55	0.49	-7.12	-2.58	0.00		-4.52	1.20	0.23	84.08	112.66	267.39	154.32	7.97	-79.85	-151.28	-33.48	-0.01	3.09	8.71	3912.79		2.57				Ba_Olv.
LL13-16	2176905	661910	-12.11	-0.14	-9.20	-3.66	-0.02	-6.47	-5.54	0.65	-0.08	59.99	-46.50	660.38	66.99	7.73	-64.69	-124.53	-26.86	0.00	2.74	3.15	105.63	0.28	2.08				Ba_Olv.
LL13-17	2177103	661907	-3.58	-0.11	-9.71	-2.50	0.01		-5.02	0.83	-0.12	77.51	-20.13	298.99	66.53	4.72	-51.66	-127.56	-24.45	0.00	0.09	-0.86	1237.82		-0.83				Ba_Olv.
LL13-18	2176106	661803	-0.94	0.17	-9.13	-2.80	0.01	-7.59	-4.75	0.58	-0.08	37.58	10.51	250.17	86.45	4.96	-66.14	-142.58	-32.22	0.04	2.66	1.82	306.95		-1.02				Ba_Olv.
LL13-19	2176204	661805	14.32	0.20	-7.78	-2.83	0.00		-4.89	0.94	-0.09	95.15	57.24	622.49	141.57	11.25	-97.25	-134.99	-39.58	0.00	3.21	2.74	1319.32	0.43	-0.36				Ba_Olv.
LL13-23	2176303	661805	17.18	0.96	-1.30	2.31	0.00		-5.05	1.30	-0.05	68.82	204.57	266.60	192.21	10.08	5.49	-114.58	-12.79	-0.02	0.14	4.29	27290.27		1.83				Ba_Olv.
LL13-24	2176402	661810	10.63	0.49	-7.12	-2.39	-0.01		-5.49	1.34	0.00	96.04	73.43	724.59	166.37	9.81	-55.60	-135.25	-8.63	-0.01	3.57	4.58	18298.15		3.16				Ba_Olv.
LL13-25	2176810	661806	-4.92	0.00	-8.73	-4.18	-0.02		-5.09	0.99	-0.13	84.29	-0.94	333.27	101.62	8.78	-93.75	-157.52	-35.47	0.00	2.78	1.92	4428.82		0.81				Ba_Olv.
LL14-12	2177004	661804	7.67	0.07	-6.31	-3.17	0.01		-1.58	1.08	-0.11	71.77	103.26	388.10	105.73	6.49	-86.29	-151.45	-30.66	0.00	0.11	1.60	648.59						Ba_Olv.
LL15-16	2175709	661702	-7.11	-0.14	-9.86	-2.91	0.00		-5.85	0.82	-0.12	60.41	-39.02	83.49	58.02	4.37	-57.77	-152.78	-30.17	0.00	2.42	1.44	6135.30	1.11	-0.81				Ba_Olv.
LL15-17	2176105	661604	-4.57	0.10	-8.65	-3.17	-0.01		-5.05	0.52	-0.05	38.67	-20.21	93.20	83.62	5.12	-56.32	-135.66	-31.07	0.00	0.09	2.67	-28.05		-0.07				Ba_Olv.
LL15-18	2176203	661608	-3.53	0.13	-7.51	-3.01	0.00		-4.23	0.64	-0.10	36.78	40.45	454.54	99.07	6.83	-63.93	-131.85	-32.74	0.00	2.82	4.24	232.30		-1.27				Ba_Olv.
LL15-19	2176305	661602	-3.98	0.04	-7.98	-2.92	0.00		-3.95	1.19	-0.13	66.07	53.25	186.40	104.05	6.84	-90.57	-162.39	-24.19	0.00	0.10	4.75	-222.56		1.96				Ba_Olv.
LL15-20	2176405	661601	6.73	0.43	-5.57	-3.01	-0.01	-7.17	-4.62	1.28	-0.03	107.09	116.55	159.39	140.07	9.84	-70.64	-143.33	-31.58	-0.01	3.34	4.63	14759.81						Ba_Olv.
LL16-17	2176507	661605	-7.17	0.13	-8.76	-3.16	-0.02	-7.38	-5.21	0.74	-0.14	42.15	1.76	238.38	96.44	8.40	-87.36	-137.73	-23.88	0.00	2.71	1.50	690.72	-0.28	2.06				Ba_Olv.
LL16-23	2176203	661507	4.09	0.12	-7.56	-3.15	-0.01	-7.17	-5.22	1.07	-0.09	76.55	36.40	174.94	106.94	7.57	-81.86	-146.40	-32.37	0.00	4.35	1.26	10223.70		1.17				Ba_Olv.
LL16-26	2176802	661508	-11.54	-0.16	-5.39	-1.37	0.01	-6.19	-3.19	-0.06	-0.12	12.41	-89.14	-217.13	5.86	-0.35	-55.68	15.30	15.30	0.00	0.08	-4.17	1431.99						Ba_Olv.
LL16-27	2177107	661501	11.20	0.59	-4.44	-0.56	0.03	-5.96	-2.08	0.21	-0.05	30.55	57.32	909.86	108.77	3.58	-12.76	68.15	-12.27	-0.01	0.12	0.52	4498.42	-0.01					Ba_Olv.

La zona productora del CGH está localizada dentro de la caldera de Los Potreros (Flores-Armenta *et al.*, 2011), en la parte norte existen 11 pozos productores (H-3, 9, 11, 15, 20, 30, 31, 32, 35, 36 y 37), en la parte central de la caldera Los Potreros cercanos a la falla de Los Humeros se encuentran 3 pozos productores más (H-1, 7 y 8) y al sur de la caldera Los Potreros se encuentra una tercer zona de producción en la inmediaciones del colapso Xalapazco y la traza de la falla Los Potreros donde existen 4 pozos productores (H-6, 12, 41, 42). La litología superficial donde están ubicados los pozos productores está constituida por depósitos piroclástico principalmente en la zona norte, basaltos de olivino en la zona central y andesitas – basaltos en la zona sur (Carrasco-Núñez *et al.*, 2015), dichas unidades litológicas presentan grados de interacción agua-roca que varía de argílica a argílica avanzada y silicificación. El balance de masa (Figura 35, 36 y 37) en dichas zonas está representado por un promedio de 9 muestras (Tabla 18), las cuales tienen altos índices de alteración, IS entre 75-90 e IQA entre 60-70.

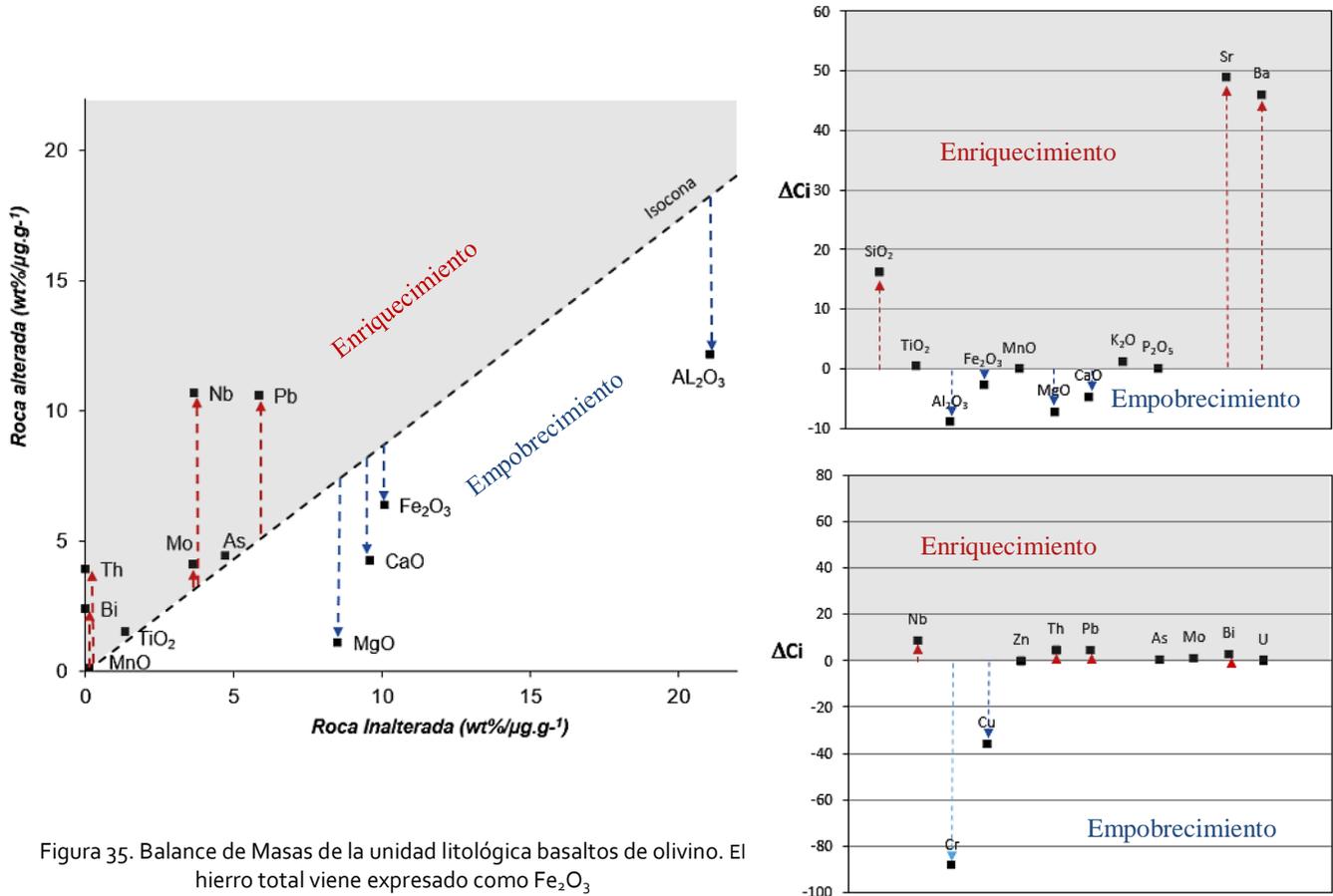


Figura 35. Balance de Masas de la unidad litológica basaltos de olivino. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃

La Figura 35 muestra el balance de masas de la unidad litológica de basaltos de olivino de la zona productora central de la caldera Los Potreros cercano a la falla de Los Humeros, incluye el diagrama de isocona con sus graficas correspondientes del incremento de concentración, donde se muestra que la zona por encima de la isocona (sombreada en gris) son elemento que han sido enriquecidos durante los procesos de alteración hidrotermal (Bi, Th, Mo, As, Nb, Pb, Sr, Ba, Zn, Rb, S, SiO₂ y K₂O). Los elementos por debajo de la isocona son los elementos que sufrieron empobrecimiento durante los procesos de interacción agua-roca señalados con una línea punteada azul (Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, MnO, CaO, Cr y Cu).

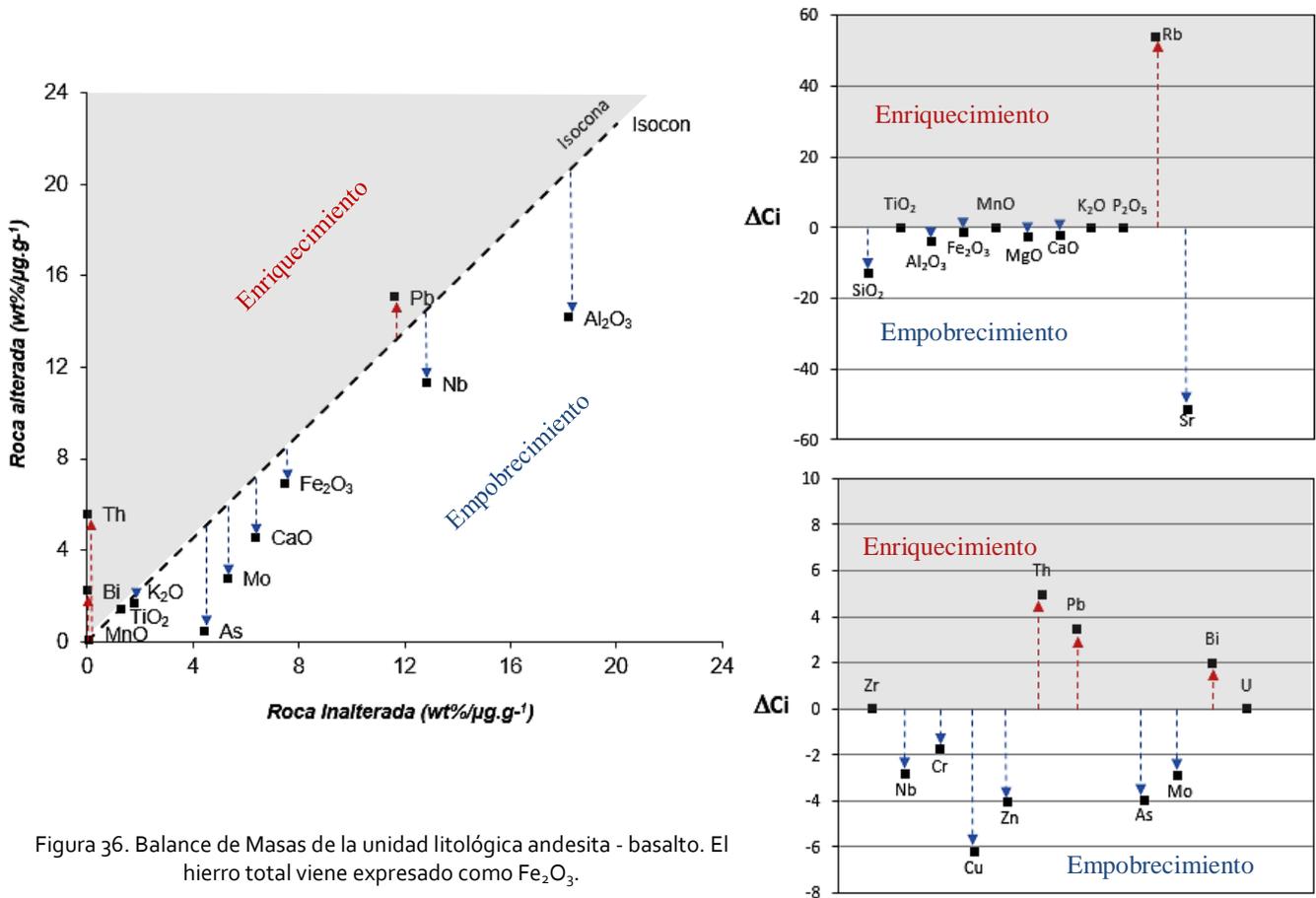


Figura 36. Balance de Masas de la unidad litológica andesita - basalto. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

El balance de masas de la unidad litológica andesita - basalto (Figura 36) de la zona productora sur de la caldera Los Potreros en las inmediaciones del colapso Xalapazco y la traza de la falla Los Potreros, se puede observar a los elemento inmóviles seleccionados mediante las herramientas estadísticas y graficas siendo los siguientes Zr, Ti₂O y MnO, los resultados muestra mediante el diagrama de isocona y sus correspondientes graficas del incremento de concentración que los elemento que han sido enriquecidos durante los procesos de alteración hidrotermal son el Rb, Th, Pb, Bi y S; siendo los siguientes elementos

los que sufrieron empobrecimiento durante los procesos de interacción agua-roca Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , CaO , Nb , Cr , Cu , Zn , As y Mo .

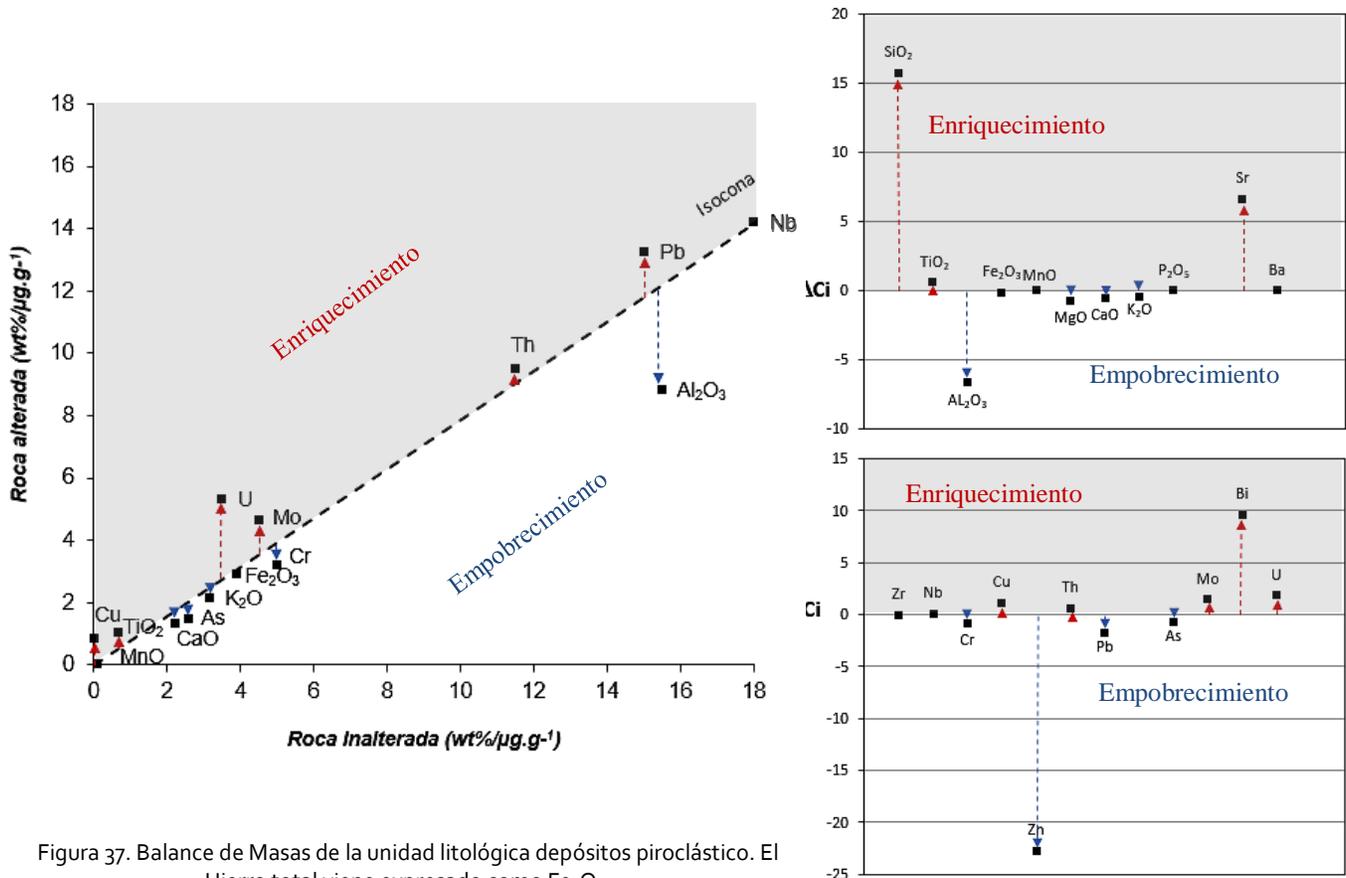


Figura 37. Balance de Masas de la unidad litológica depósitos piroclástico. El Hierro total viene expresado como Fe_2O_3 .

La unidad litológica constituida por depósitos piroclásticos (Figura 37) de la zona productora norte de la caldera Los Potreros, muestra que la zona por encima de la isocona se encuentran elementos como el Cu , Th , Mo , Bi , U , SiO_2 , Ti_2O , y Sr ; mientras que los elementos por debajo de la isocona son los elementos que sufrieron empobrecimiento durante los procesos de interacción agua-roca siendo estos el Al_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Cr y Zn . Esta unidad litológica presenta una ganancia del 27.14 % con respecto al total de la masa de la roca fresca. Cabe mencionar que el aluminio es considerado un elemento inmóvil debido a su baja solubilidad (O'Hara, 1990, Grant, 1986) sin embargo en el balance de masas de CGH el Al_2O_3 muestra un empobrecimiento mayor al 4% de su concentración original movilidad que ha sido reportada para los proceso de alteración hidrotermal (Izaguirre *et al.*, 2012).

Los resultados obtenidos por el balance de masas permitieron determinar de manera semicuantitativa el cambio de masa total de las tres zonas productivas del CGH, además del enriquecimiento y empobrecimiento e inmovilidad elemental asociado a los procesos de interacción agua/roca. El balance

de masas sugiere que la unidad de depósitos piroclásticos es más susceptible a la alteración hidrotermal y en consecuencia a cambiar la masa (27.14 %), seguido por la unidad de basaltos de olivino (15.17 %) y la unidad de andesitas – basaltos (-11.60%), siendo esta última la única unidad que presenta una disminución de masa. Ambos procesos (pérdida o aumento de masas) están íntimamente relacionados con el porcentaje de interacción agua-roca, ya que aunque las tres zonas están presentes en la caldera de Los Potreros la alteración en la zona sur de andesitas – basaltos muestra mayormente silicificación y argilización, mientras que en la zona de basaltos de olivino la alteración varía de argílica a argílica avanzada con valores más altos en índices de argilización (>90) la zona norte de depósitos piroclásticos presenta en mayor medida alteración argílica – argílica avanzada.

Los datos obtenidos sugieren que las rocas que no presentan pérdida de masa (depósitos piroclásticos y basaltos de olivino) están mayormente enriquecidas en SiO_2 , Bi, Th, Mo y Sr, y empobrecidas en Al_2O_3 , CaO y Cr. Las rocas que presentan pérdida de masa son enriquecidas en Bi, Th y Rb, y empobrecidas en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, Cr y Cu los elementos mencionados son comunes en las tres litologías. Con estos resultados obtenidos se demuestra que el fluido que origina la alteración en el CGH tiene altas concentraciones en los elementos enriquecidos, y la capacidad de incorporar elementos a la roca encajonante.

El primer y único intento de un balance de masas realizado en el CGH se realizó en los pozos H-15, H-16, H-17, H-29 (zona de Colapso Central) y H-12 (próximo al colapso de Xalapazco) en donde se determinó que la disminución de potasio (K_2O) dentro de las unidades riolíticas y dacíticas (1300 m) se debía al procesos de albitización hidrotermal de los feldespatos primarios, este mismo fenómeno se presenta en los depósitos piroclástico superficiales. En el caso de las tobas ácidas presentes a profundidades <1000 m, se observó alta concentración de Na_2O , lo cual se debe a la transformación de minerales primario a minerales arcillosos, zeolitas sódico-cálcicas y en el caso del SiO_2 en las rocas ácidas disminuye. Para las andesitas y tobas riolíticas se aprecian fuertes aumentos de SiO_2 con respecto a las rocas sin alterar, fenómeno contrario a lo observado en superficie por parte de los depósitos piroclásticos, mientras que el caso del TiO_2 y el MgO muestran una menor movilidad bajo la acción de fenómenos de hidrotermalismo (Martínez-Serrano y Chantal, 1994), estos últimos elementos en superficie presentaron baja movilidad en las tres unidades litológicas.

Tabla 18. Resultados del Balance de Masas de las principales litologías superficiales de las zonas productoras del CGH. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Balance de Masas para Basaltos Olivino del CGH

						Cambio de masa en general (%)		15.17		
Tabla						Pendiente de la Isocona		0.87		
Estadísticas de datos geoquímicos de las muestras alteradas						Ganancia/Perdida				
Muestra	n	Mediana	Media	S.D	en wt.% o μg*g-1	ΔC _i				
SiO ₂	9	54.4	55.8	5.6	16.15					
TiO ₂	9	1.5	1.5	0.4	0.39					
Al ₂ O ₃	9	12.6	12.1	2.6	-7.12					
Fe ₂ O ₃	9	6.5	6.4	2.3	-2.75					
MnO	9	0.1	0.1	0.0	0.01					
MgO	9	3.9	1.1	1.1	-7.26					
CaO	9	4.2	4.2	2.0	-4.71					
K ₂ O	9	1.3	1.5	0.8	1.19					
P ₂ O ₅	9	0.3	0.3	0.1	0.04					
Rb	9	85.0	85.9	42.3	93.73					
Sr	9	387.7	366.7	87.0	48.92					
Ba	9	811.7	406.5	233.0	46.01					
Zr	9	244.9	254.7	65.7	166.43					
Nb	9	12.6	10.7	5.6	8.63					
Cr	9	46.1	92.1	121.1	-88.25					
Cu	9	28.9	24.8	23.1	-35.64					
Zn	9	64.1	66.0	19.7	-0.01					
Th	9	2.8	3.9	4.4	4.49					
Pb	9	11.8	10.6	4.4	6.34					
S	9	3760.5	4853.8	4673.7	5183.24					
As	9	8.7	4.4	4.1	0.37					
Mo	9	4.7	4.1	1.4	1.11					
Bi	9	10.8	2.4	3.2	2.76					
U	9	0.0	0.0	0.0	0.00					

Balance de Masas para Andesitas - Basaltos del CGH

						Cambio de masa en general (%)		-11.60		
Tabla						Pendiente de la Isocona		1.13		
Estadísticas de datos geoquímicos de las muestras alteradas						Ganancia/Perdida				
Muestra	n	Mediana	Media	S.D	en wt.% o μg*g-1	ΔC _i				
SiO ₂	8	49.6	48.7	2.0	-13.07					
TiO ₂	8	1.4	1.4	0.1	-0.03					
Al ₂ O ₃	8	14.1	14.2	1.2	-5.66					
Fe ₂ O ₃	8	6.9	6.9	0.2	-1.33					
MnO	8	0.1	0.1	0.0	0.02					
MgO	8	1.6	1.4	0.1	-2.85					
CaO	8	4.6	4.6	0.3	-2.34					
K ₂ O	8	1.7	1.7	0.1	-0.24					
P ₂ O ₅	8	0.2	0.3	0.1	-0.07					
Rb	8	110.7	106.1	17.7	53.84					
Sr	8	448.4	449.9	15.2	-51.32					
Ba	8	905.9	870.2	162.3	-482.94					
Zr	8	241.5	242.5	9.9	0.00					
Nb	8	11.5	11.3	1.1	-2.84					
Cr	8	27.8	30.1	6.0	-1.74					
Cu	8	27.5	29.6	7.2	-6.17					
Zn	8	80.5	81.5	8.3	-4.11					
Th	8	5.6	5.6	1.2	4.96					
Pb	8	12.7	15.1	7.9	1.71					
S	8	937.1	1052.7	316.2	930.53					
As	8	4.4	0.5	0.0	-3.99					
Mo	8	4.4	2.8	0.8	-2.86					
Bi	8	3.7	2.2	0.8	1.98					
U	8	0.0	0.0	0.0	0.00					

Balance de Masas para Depósitos Piroclásticos del CGH

						Cambio de masa en general (%)		27.14		
Tabla						Pendiente de la Isocona		0.79		
Estadísticas de datos geoquímicos de las muestras alteradas						Ganancia/Perdida				
Muestra	n	Mediana	Media	S.D	en wt.% o μg*g-1	ΔC _i				
SiO ₂	9	66.3	63.5	10.2	15.74					
TiO ₂	9	0.8	1.1	0.5	0.68					
Al ₂ O ₃	9	8.4	8.8	2.9	-4.22					
Fe ₂ O ₃	9	2.7	2.9	0.7	-0.16					
MnO	9	0.1	0.1	0.0	0.00					
MgO	9	0.7	0.1	0.0	-0.66					
CaO	9	1.2	1.3	0.5	-0.54					
K ₂ O	9	1.7	2.2	0.9	-0.39					
P ₂ O ₅	9	0.1	0.1	0.0	-0.01					
Rb	9	107.0	119.3	62.8	60.72					
Sr	9	172.8	182.2	89.0	6.65					
Ba	9	0.0	0.0	0.0	0.00					
Zr	9	318.4	319.3	38.3	0.00					
Nb	9	15.4	14.2	2.7	0.08					
Cr	9	11.8	3.2	5.6	-0.90					
Cu	9	2.6	0.9	0.0	1.09					
Zn	9	26.1	26.1	16.8	-22.76					
Th	9	9.8	9.5	4.0	0.59					
Pb	9	13.1	13.3	5.8	1.88					
S	9	4146.4	8270.2	11756.8	10514.52					
As	9	3.3	1.5	0.5	-0.73					
Mo	9	4.7	4.7	1.6	1.43					
Bi	9	10.6	7.5	2.7	9.58					
U	9	6.9	5.4	3.8	3.31					

VII.V.II Método de correlación geoquímica bivariable

Con los datos obtenidos mediante el balance de masas de las tres principales zona productoras del CGH, se realizaron matrices de correlación Pearson "r" (Anexo VI), con la finalidad de describir la relación lineal entre los conjuntos de variables a nivel de intervalo se consideró que el valor que estuvieran entre 0.7 a 0.9 corresponden a una correlación de los datos alta y se consideraron valores >0.9 como correlaciones muy altas, ambos valores pueden ser positivos o negativos (Vázquez., 2010, Izaguirre *et al.*, 2012). Debido a la gran variabilidad que presentan las matrices de correlación, y a los resultados del balance de masas se optó por realizar una correlación bivariable entre el Aluminio (Al) y los elementos mayores, menores y traza analizados, por ser este un elemento que se empobrece y que está presente en la alteración argílica –argílica avanzada, de igual manera se hizo la correlación del elemento Silicio (Si) por ser un elemento que se enriquece durante los procesos de silicificación (Figuras 38, 39 y 40). Los coeficientes de correlación varían entre -1 y +1, cuando $r=0$, significa una total independencia entre dos elemento analizados, cuando $r=+1$ indica una correlación directa y cuando $r=-1$, representa una correlación funcional inversa (Izaguirre *et al.*, 2012).

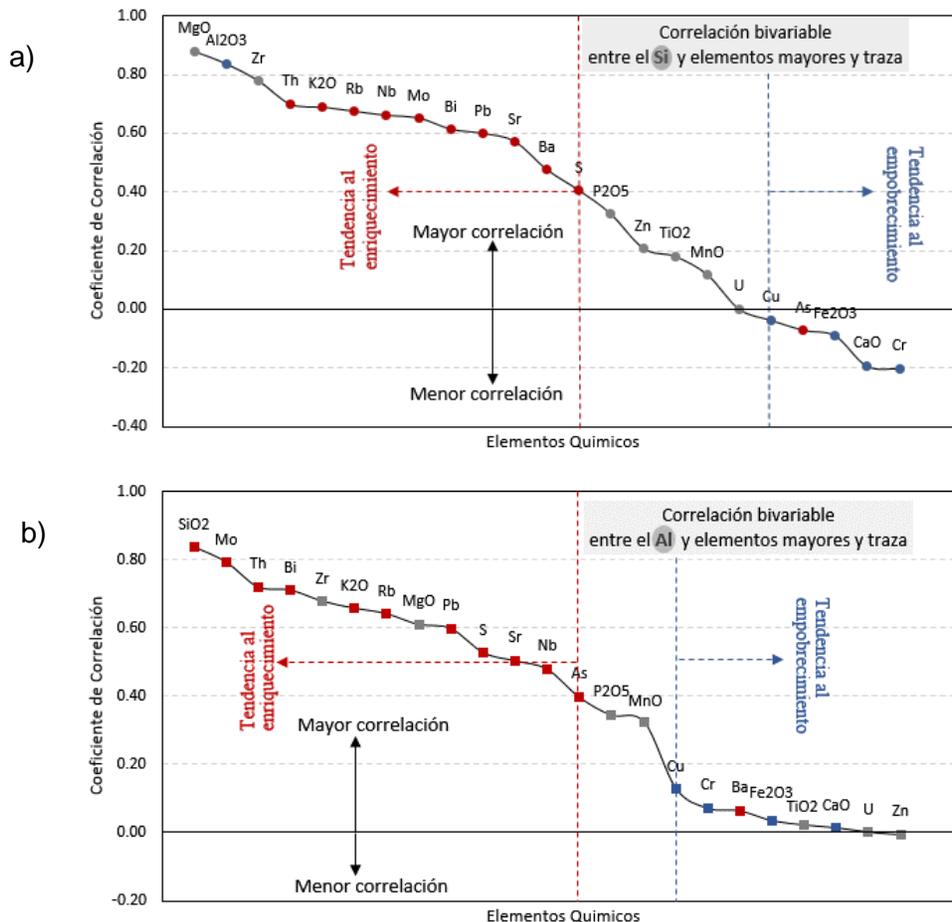


Figura 38. Coeficientes de correlación bivariable del Si y Al con respecto a los elementos mayores y traza de la unidad litológica basaltos de olivino del CGH. El hierro total viene expresado como Fe_2O_3 .

Los resultados de la correlación geoquímica bivariable de la unidad litológica de basaltos olivino quedan ilustrados en los gráficos binarios de coeficiente de correlación del Si y Al vs elementos mayores, menores y traza (Figura 38), donde en el caso del Si muestra fuertes correlaciones positivas (0.7-0.9) con el Th y Al_2O_3 , correlaciones moderadas positivas (0.5-0.7) con K_2O , Rb, Nb, Mo, Bi, Pb, y Sr. Los elementos Cu, As, CaO, Fe_2O_3T y Cr muestran una correlación negativa muy baja (0 - 0.2), cabe señalar que solo se están tomando en cuenta en la descripción de los datos los elementos que han sido enriquecidos o empobrecidos durante los procesos de la interacción agua/roca. Las correlaciones geoquímicas del Al se muestran altas con respecto al SiO_2 , Mo, Th y Bi, correlaciones moderadas con respecto a K_2O , Rb, Pb, S y Sr, correlaciones bajas con Nb y As, y correlaciones muy bajas con Cu, Cr, Ba, Fe_2O_3T , CaO. Para el Al no se presentó ninguna correlación negativa.

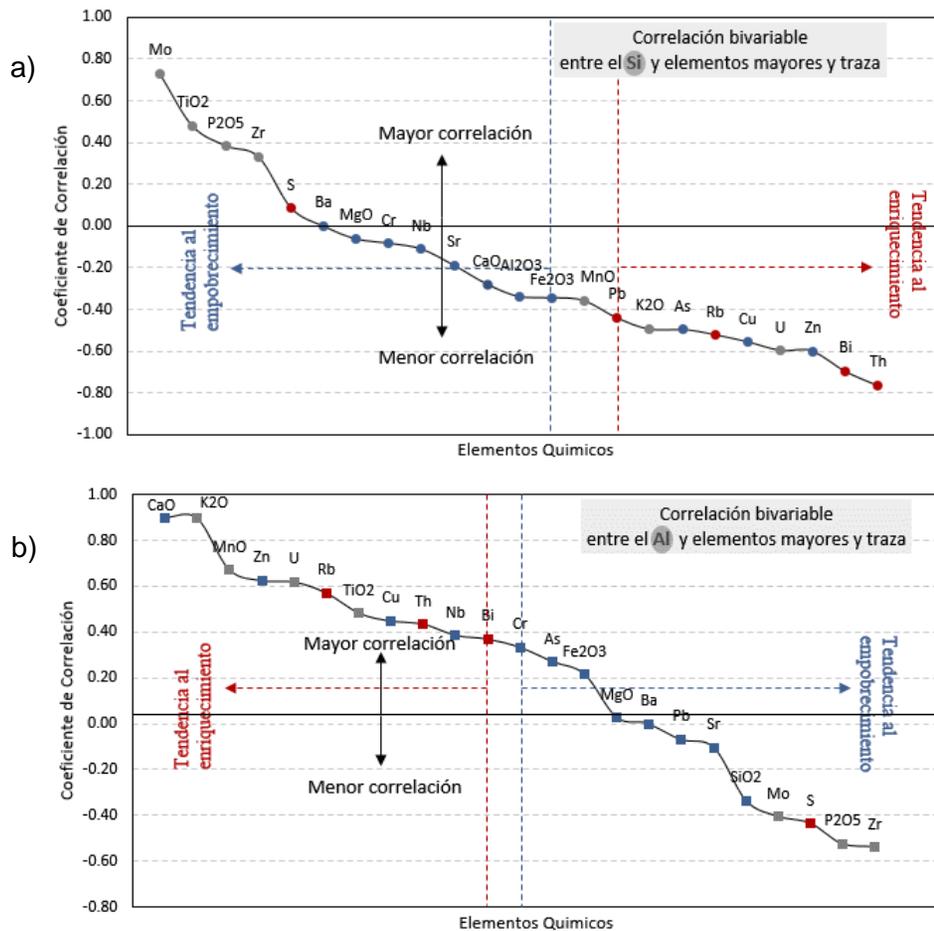


Figura 39. Coeficientes de correlación bivariable del Si y Al con respecto a los elementos mayores y traza de la unidad litológica andesita - basalto del CGH. El hierro total viene expresado como Fe_2O_3 .

La correlación geoquímica bivariable de la unidad litológica de andesitas – basaltos, que corresponde a la zona sur productora del CGH, refleja para los coeficientes de correlación para el Si vs elementos mayores, menores y traza (Figura 39-a) que el único elemento que muestra fuerte correlación positiva es el Mo, mientras que los elementos S y Ba presentan muy baja correlación. En el caso de las correlaciones

negativas la unidad muestra muy bajas correlaciones para MgO, Cr, Nb, Sr, y CaO, bajas correlaciones para Al₂O₃, Fe₂O_{3T} y Pb, moderadas correlaciones geoquímicas para los elementos As, Rb, Cu y Zn, mientras que el Bi y Th presenta correlaciones negativas altas. Las correlaciones geoquímicas con respecto al Al se presentaron muy altas (>0.9) para el CaO, moderadas correlaciones para Zn y Rb, bajas correlaciones para Cu, Th y Nb, muy bajas correlaciones para Bi, Cr, As y Fe₂O_{3T}, y nulas correlaciones para el caso del MgO. Las correlaciones negativas para el Al se mostraron nulas para Ba, Pb y Sr, muy baja correlación para el SiO₂ y bajas correlaciones para P₂O₅.

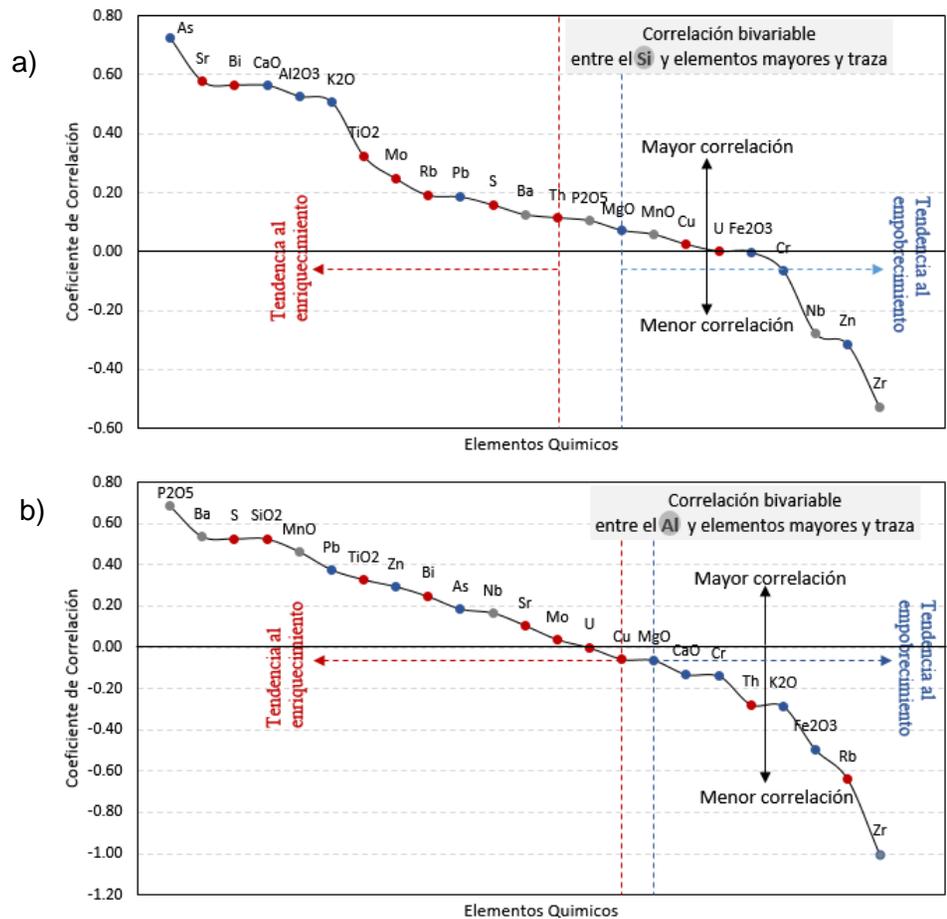


Figura 40. Coeficientes de correlación bivariante del Si y Al con respecto a los elementos mayores y traza de la unidad litológica identificada como depósitos piroclásticos del CGH. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

La unidad compuesta por depósitos piroclásticos (Figura 40), la cual corresponde a la zona productora norte, presenta altos coeficientes de correlación positivos para el Si para el elemento As, moderadas correlaciones para Sr, Bi, CaO, Al₂O₃ y K₂O, y muy bajas correlaciones positivas para el TiO₂ y Mo, nulas correlaciones para Rb, Pb, S, Th, MgO, Cu y Fe₂O_{3T}. Las correlaciones geoquímicas negativas de la unidad litológica se presentaron nulas para el Cr, muy bajas correlaciones para el Nb, y moderadas correlaciones para el Zn. Para el caso de las correlaciones negativas para el Al, los depósitos piroclásticos presentaron

moderadas correlaciones para el S y SiO₂, bajas correlaciones para Pb y TiO₂, muy bajas correlaciones Zn, Bi y As, y nulas correlaciones para Sr, Mo y U. Para las correlaciones negativas de la unidad litológica de la zona norte del CGH, presenta nulas para Cu y MgO, muy bajas correlaciones para CaO, Cr, Th y K₂O, y moderadas correlaciones para Fe₂O_{3T} y Rb.

La correlación bivariable realizada al balance de masas de las tres unidades litológicas del CGH, sugiere que los elementos que presentaron enriquecimiento (SiO₂, Th, Sr, Rb, Bi) coinciden con los elementos de mayor correlación positiva, por el contrario los elementos que presentaron una mayor correlación negativa (Zn y Fe₂O_{3T}) coinciden con elementos empobrecidos, sin embargo existe ciertos elementos con una fuerte correlación positiva en elementos empobrecidos como el CaO, Cu y Cr. El análisis de los resultados de la correlación bivariable apoyan lo obtenido mediante el balance de masas de manera consistente, sugiriendo una correlación en el comportamiento de los elementos con el estudio de balance de masas.

VII Interpolación de los Datos Mediante el Método de Interpolación Kriging Ordinario

Los datos discretos obtenidos en el balance de masas del muestreo local son los que se interpolaron, con el objetivo de proyectar mapas con superficies continuas, mientras que los datos obtenidos mediante el balance de masas del muestreo regional indica únicamente la distribución espacial y abundancia debido a que la densidad de datos es insuficientes para una interpolación representativa. El proceso que se llevó a cabo mediante la interpolación esta sintetizado mediante el diagrama de flujo de la Figura 41, este proceso optimiza el análisis espacial de los datos mediante la eliminación de tendencias que puedan presentar los datos (constante, 1er, 2do y 3er grado), lo que permite representar los valores más semejantes los unos con los otros (cálculo del variograma experimental), y así definir si existe efecto pepita en los datos utilizados y la existencia de cambios en la continuidad espacial de los datos con la dirección (anisotropía), finalmente los datos ajustados se modelan con un modelo teórico (esférico, gaussiano, exponencial, etc.), después se fija la cantidad de datos vecinos y se obtiene la validación cruzada de los datos, finalmente obtenemos la estimación de los datos mediante el kriging ordinario.

La representación gráfica del balance de masas del CGH mediante superficies continuas obtenidas por el método de interpolación kriging junto a la distribución espacial y abundancia del muestreo regional de las figuras 41-a,b,c, d y 42-a,b,c, d, e; obedecen a un análisis geoestadísticos con tres principales parámetros: 1.- medidas de tendencia central (media, mediana y moda) con la cuales identificamos el dato más representativo de la distribución del conjunto de datos, 2.- medidas de dispersión (desviación estándar, varianza y coeficientes de variación) las cuales nos indican la mayor o menor concentración de

los datos con respecto a las medidas de centralización dándonos una idea de la homogeneidad o que tan agrupados están los datos, 3.- coeficientes de forma de distribución (coeficiente de curtosis y coeficiente de sesgo o simetría) que miden el grado de deformación respecto a una curva o patrón (distribución normal).

Un parámetro adicional utilizado obedece a la estricta definición de anomalía geoquímica, la cual debe separarse de un grupo más amplio de datos (valor de fondo o background) donde para ser detectada la anomalía tiene que desviarse claramente de este grupo y debe estar por encima del límite superior de la fluctuaciones del background (umbral geoquímico o threshold), en sensu strito una anomalía geoquímica son aquellos valores que estén por encima del umbral geoquímico (+), que es la media poblacional más dos desviaciones estándar (anomalía positiva) (Figura 42) o el umbral geoquímico (-) que es la media poblacional menos dos desviaciones estándar (anomalía negativa).

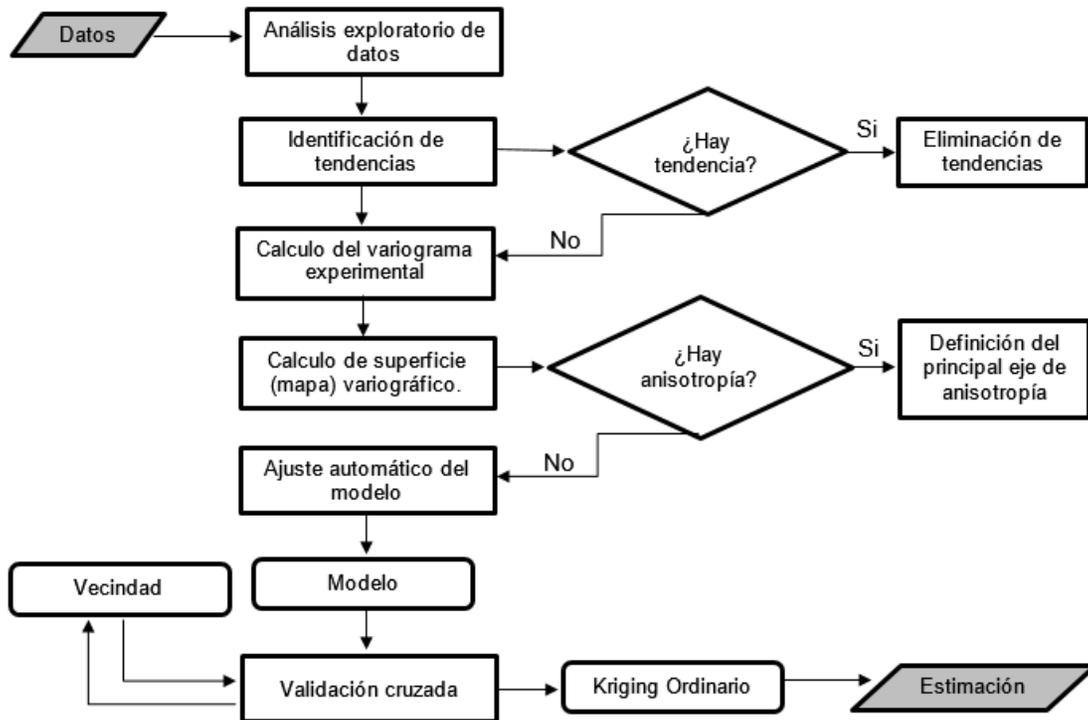


Figura 41. Diagrama de flujo que sintetiza el procedimiento estadístico que se llevó a cabo para el análisis espacial de los datos obtenidos mediante el balance de masas de las muestras locales del CGH.

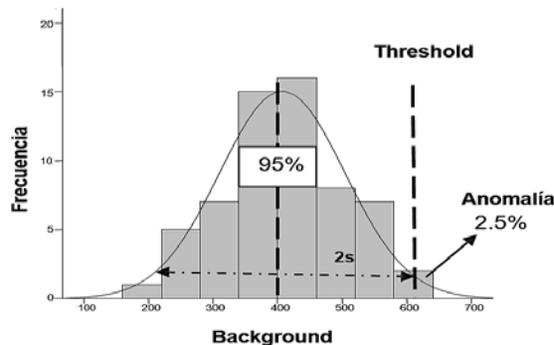


Figura 42. Parámetros geoquímicos de una distribución normal

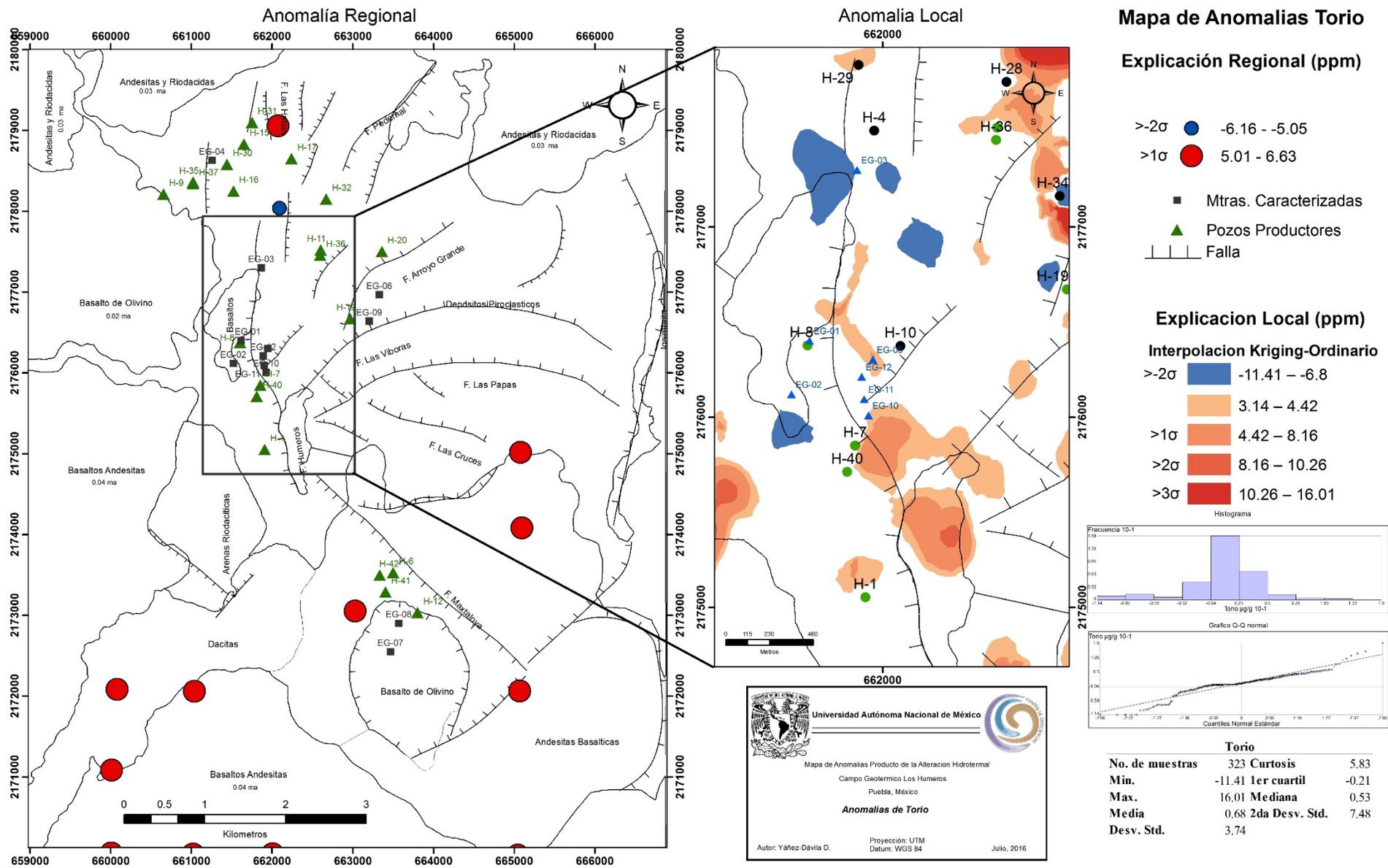
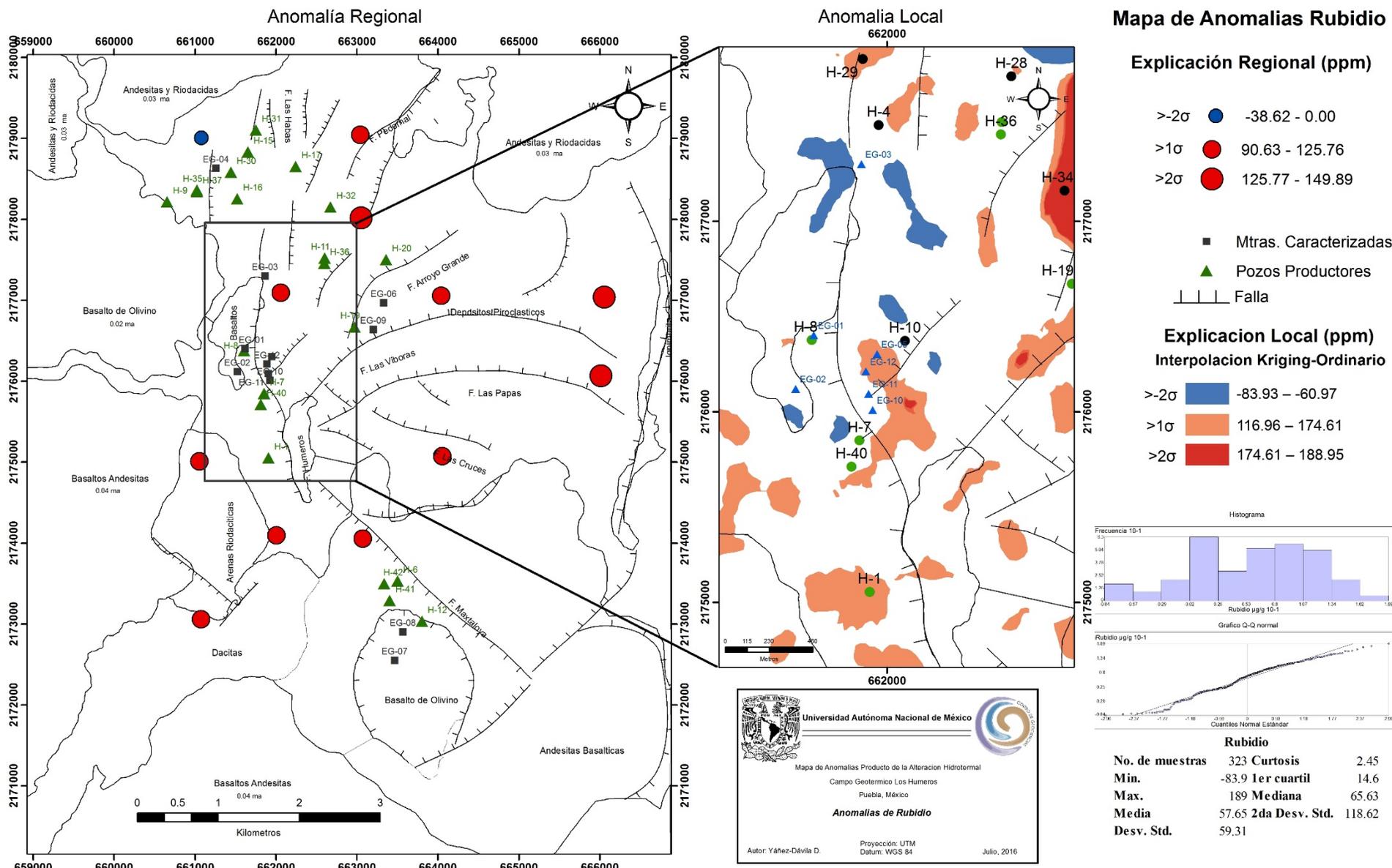


Figura 43-a. Anomalías geoquímicas predominantemente positivas del CGH de Torio.



Figuran 43-b. Anomalías geoquímicas predominantemente positivas del CGH de Rubidio.

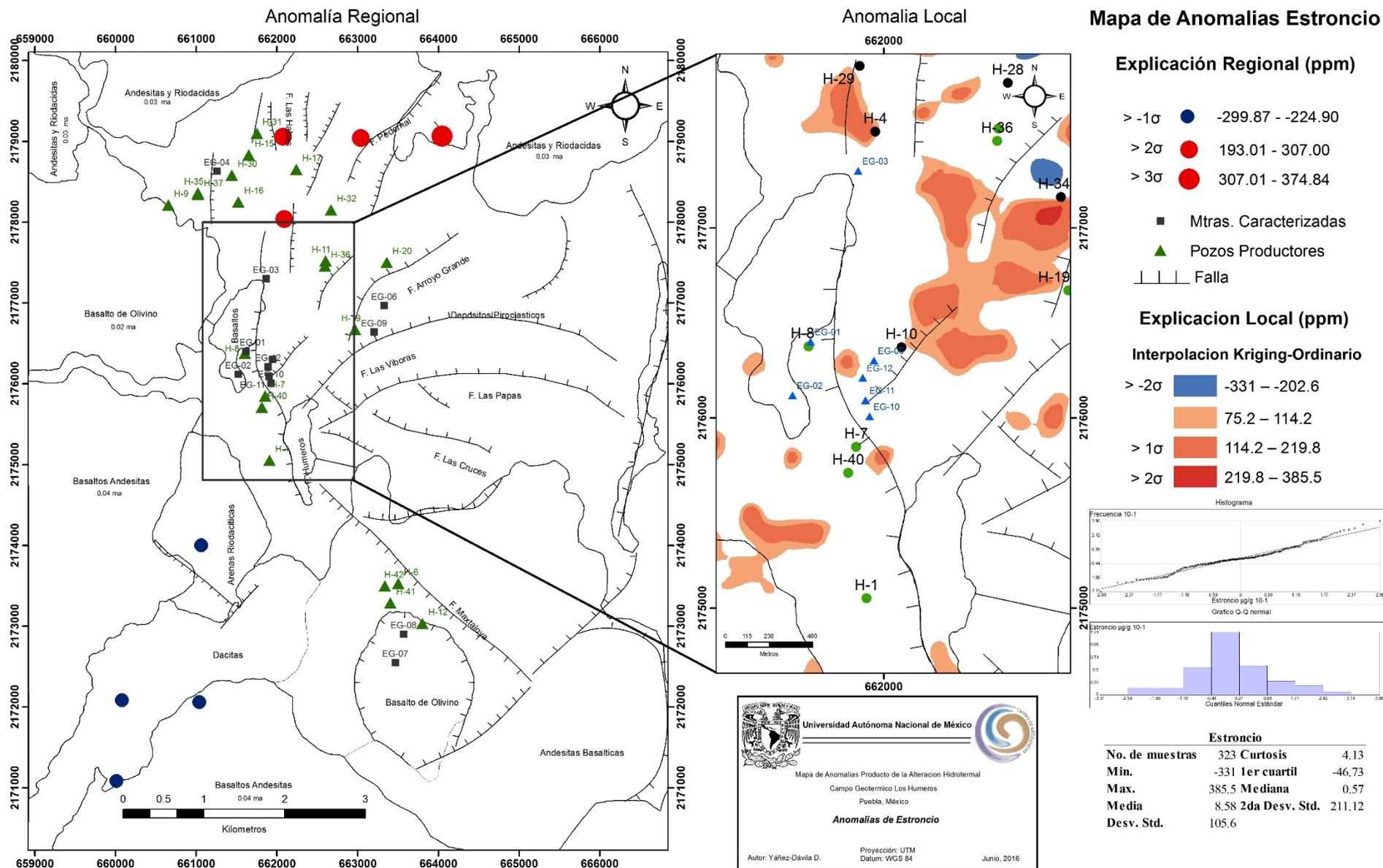


Figura 43-c. Anomalías geoquímicas predominantemente positivas del CGH de Estroncio.

Los resultados de las anomalías geoquímicas del torio (Figura 43-a) en el CGH son predominantemente positivas, con anomalías en el muestreo regional en la zona productora norte y sur del campo geotérmico, sin embargo son valores por debajo del umbral geoquímico ($<2\sigma$) por lo que no se pueden considerar anomalías significativas en el sentido estricto; en el muestreo local los valores obtenidos son significativos arriba de $>3\sigma$ (10.26 – 16.01 ppm), el torio presentó pequeñas zonas de empobrecimiento al norte de la falla de los humeros. El rubidio presentó anomalías predominante-mente positivas (Figura 43-b), en el muestreo regional las anomalías están distribuidas tanto en la zona norte, central y sur del campo, con valores por encima del umbral geoquímico ($<2\sigma$), en el muestreo local se muestran zonas enriquecidas con valores arriba de $>3\sigma$ (174.61 - 188.95 ppm), al igual que el torio el rubidio presentó anomalías empobrecidas al norte de la falla de los humeros. En el caso del Estroncio (Figura 43-c), este elemento presentó enriquecimiento regional en la zona norte del campo geotérmico y empobrecimiento en un sector sur-oeste aislado de pozos exploratorios. Localmente se observa enriquecimientos por encima del umbral geoquímico $>2\sigma$ (219.8 – 385.5 ppm) al noreste del muestreo local, y valores de cercanos al umbral geoquímicos alrededor de las fallas principales.

La distribución espacial de las anomalías elementales producto de la interacción agua-roca observada en las Figuras 43-a, b y c muestra patrones similares para los elementos enriquecidos, siguiendo trazas de fallas existentes como lo es la falla Arroyo Grande, Las Papas, Las Víboras, la falla de más extensión en la zona Los Humeros. Las dos principales unidades litológicas en la zona productora central y norte de la caldera de Los Potreros son basaltos de olivino y depósitos piroclásticos, ambas unidades presentan alteración argílica – argílica avanzada cuyo balance de masas muestra que los elementos enriquecidos durante los procesos de alteración hidrotermal son el Bi, Th, Mo, As, Nb, Pb, Sr, Ba, Zn, Rb, S, SiO₂, Cu, U, y K₂O. Para efectos de este estudio solo se muestran los resultados de Th, Rb y Sr debido a que la correlación bivariable realizada al balance de masas sugiere que los elementos Th, Rb y Sr son los de mayor coeficiente de correlación (>0.5).

Estos elementos pueden ser considerados bajo otros parámetros de exploración geológicos, geoquímicos y geofísicos como elementos indicadores de zonas productivas en el campo geotérmico de Los Humeros ya que indican fuerte correlación geoquímica con la alteración hidrotermal y las zonas de producción actual.

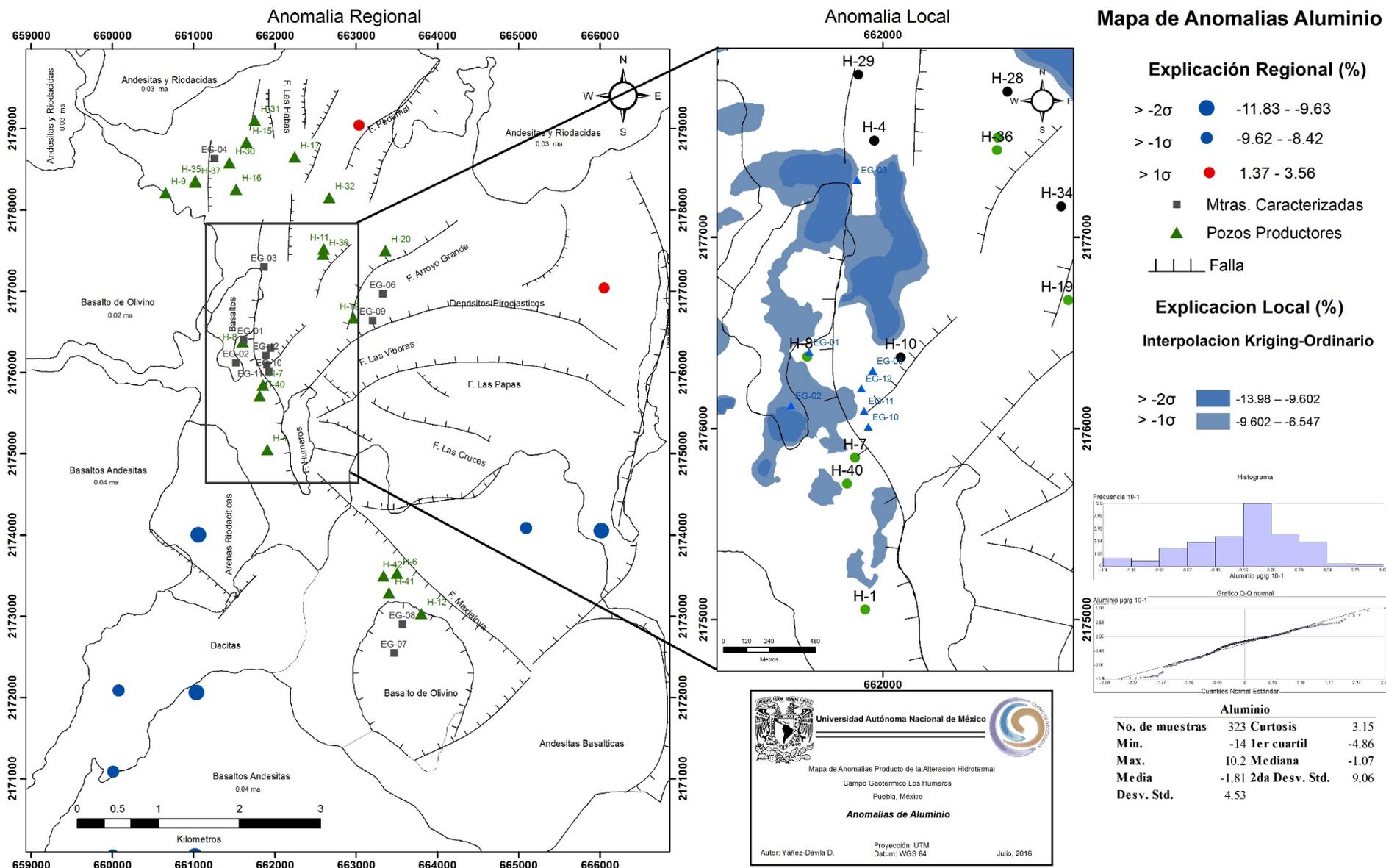


Figura 44-a. Anomalías geoquímicas predominantemente negativas del CGH de Aluminio.

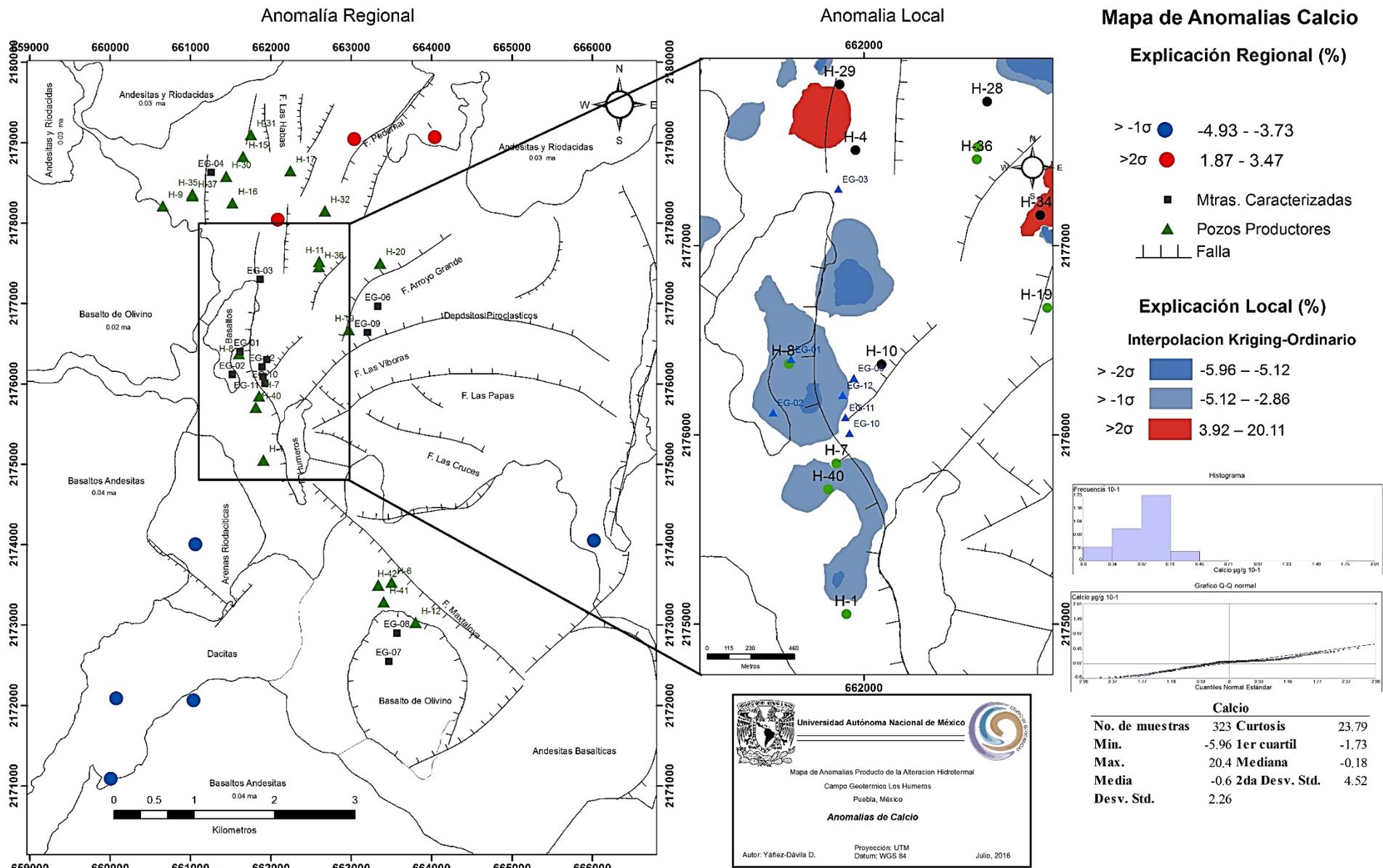


Figura 44-b. Anomalías geoquímicas predominantemente negativas del CGH de Calcio.

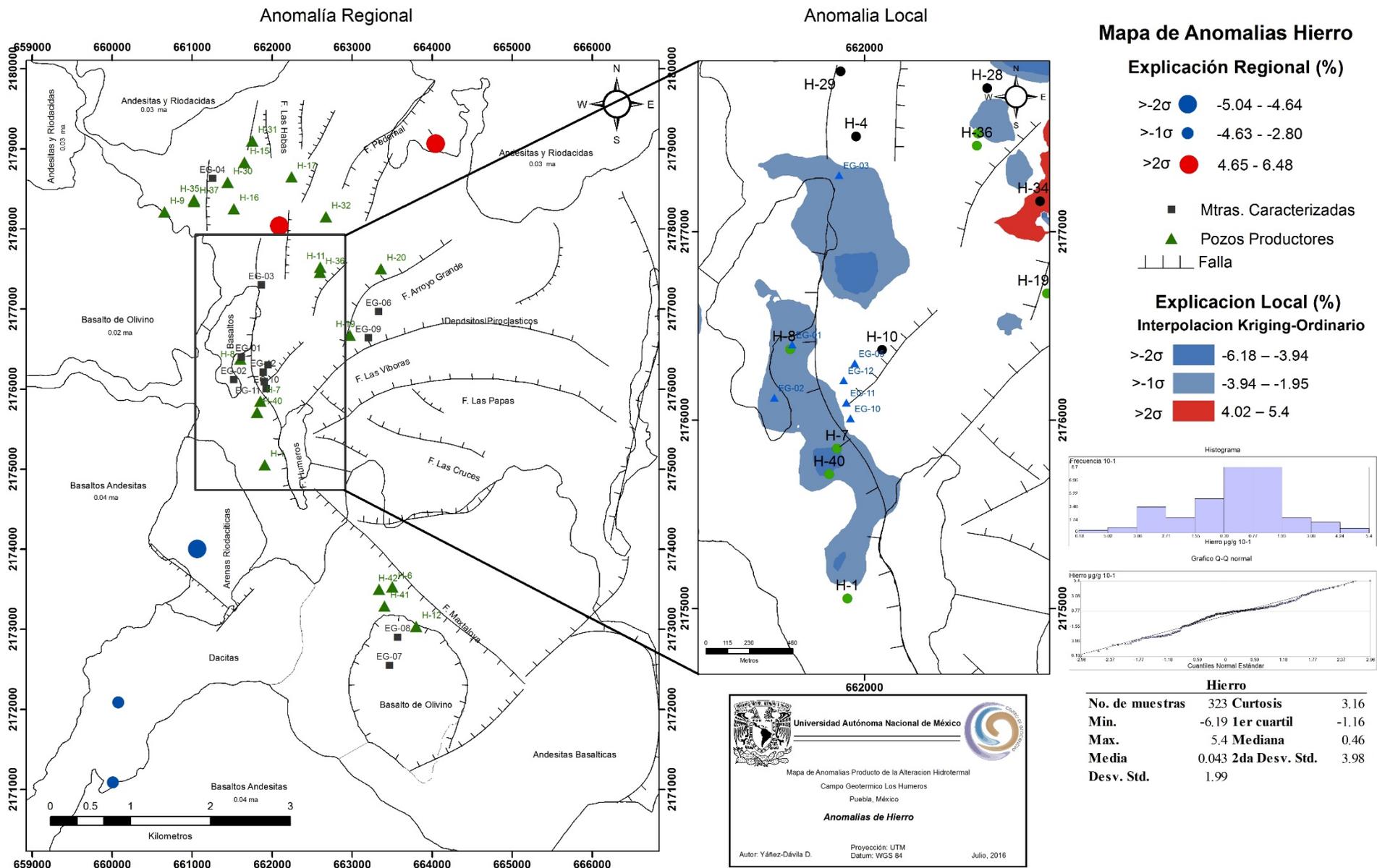


Figura 44-c. Anomalías geoquímicas predominantemente negativas del CGH de Hierro.

Los resultados de las anomalías geoquímicas del aluminio (Figura 44-a) son predominantemente negativas, el muestreo regional muestra anomalías en la zona productora sur del campo geotérmico, con valores por encima del umbral geoquímico ($<2\sigma$); en el muestreo local existen valores obtenidos mediante el balance de masas están por encima de $>2\sigma$ (-13.98 – 9.60 ppm), el aluminio presentó un pequeño de enriquecimiento en la zona norte en el muestreo regional. El calcio presentó anomalías predominantemente negativas (Figura 44-b), en el muestreo regional las anomalías están distribuidas principalmente al sur del campo con valores por debajo del umbral geoquímico ($<1\sigma$), en el muestreo local se muestran zonas empobrecidas con valores arriba de $>2\sigma$ (-5.96 - -5.12 ppm), al igual que el aluminio el calcio presentó pequeñas zonas con anomalías enriquecidas en la zona productora norte del campo geotérmico y al norte de la falla de los humeros. En el caso del hierro (Figura 44-c), este elemento presentó empobrecimiento regional en la zona sur, con un enriquecimiento en la zona norte del campo geotérmico, localmente se observa enriquecimientos por encima del umbral geoquímico >2 (-6.18 - -3.94 ppm).

La distribución espacial de las anomalías elementales predominantemente negativas observada en las Figuras 44-a, b y c muestra patrones similares para los elementos empobrecidos, siguiendo trazas de fallas. Las dos principales unidades litológicas en la zona productora central y norte de la caldera de Los Potreros son basaltos de olivino y depósitos piroclásticos, ambas unidades presentan alteración argílica – argílica avanzada cuyo balance de masas mostró que los elementos enriquecidos durante los procesos de alteración hidrotermal son el Al_2O_3 , Cr, Cu, Zn, CaO, MgO, K_2O y $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$. Para efectos de este estudio solo se muestran los resultados de Al_2O_3 , CaO y Fe_2O_3 debido a que la correlación bivariable realizada al balance de masas sugiere que los elementos Al_2O_3 , CaO y $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ son los de mayor coeficiente de correlación ($> - 0.5$).

A diferencia de las anomalías positivas las negativas no son usadas directamente para la exploración geoquímica, ya que el empobrecimiento puede no estar asociado directamente con la integración agua-roca, por lo que únicamente se puede utilizar como una aseveración más para la movilidad elemental del campo geotérmico de Los Humeros.

VIII CONCLUSIONES

Las inclusiones fluidas estudiadas en el presente trabajo (H-41, 42 y 43) son las de mayor salinidad con rangos máximos de 12.86 % en peso eq. de NaCl esta salinidad es debida a constantes procesos de ebullición generalmente ocasionado por una pérdida de presión hacia niveles someros originado muy probablemente por el sistema de fallas presente en la zona productora sur, propiciando un exceso de entalpía en esta zona. La temperatura medida de las inclusiones fluidas después de los 1815 m en el pozo H-43 en estado crítico muestra una zona donde la temperatura excede los 374°C, indicando un gradiente térmico superior a cualquier otra zona medida en el CGH.

Se determinó que uno de los principales fenómenos que ocurre en el CGH es de dilución por fluidos superficiales y ebullición.

El uso de diagrama bivariable de profundidades estimadas vs profundidades reales proporcionó resultados similares al diagrama comúnmente usado de temperatura de homogenización vs salinidad, siendo favorable su uso para el CGH.

La evolución térmica del CGH obtenida a partir de las inclusiones fluidas y las temperaturas estabilizadas indica que existe un proceso de enfriamiento debido a que las isotermas de las inclusiones fluidas están más someras que las isotermas de las temperaturas estabilizadas actualmente, sin embargo la afirmación anterior está sujeta a que exista la posibilidad de que las temperaturas estabilizadas estén subestimadas, y aunque existen nuevos métodos de estimación de temperaturas estabilizadas (Santoyo *et al.*, 2000) aún no existe un método exacto para el cálculo de temperaturas estabilizadas (Andaverde *et al.*, 2005).

En el CGH se destacan dos zonas donde el gradiente de temperatura es mayor (≥ 174.23 °C/km), ambas zonas corresponden con las zonas productoras norte y sur dentro de la caldera de Los Potreros, de igual manera se puede observar que las temperaturas disminuyen hacia el este de la caldera.

El zoneamiento mineralógico producto de la alteración hidrotermal del CGH obtenido por el análisis petrográfico y minerográfico está dividido en cuatro zonas: zona I argílica (<400), zona II propilítica que es a su vez dividida en baja, media y alta temperatura, zona III con asociaciones paragenéticas de alta acidez presente solo en ciertos sectores del CGH y la zona IV alteración hidrotermal tipo skarn (>1800m).

Se determinó con base a las asociaciones mineralógicas obtenidas por DRX y SWIR que la alteración superficial existen en el CGH varían de argílica (esmectita + cuarzo + montmorillonita + calcita + ópalo), argílica avanzada (esmectita + caolinita + montmorillonita + cuarzo), silícica (esmectita + dickita + cristobalita + ópalo) y argílica avanzada – ácido sulfato (esmectita + dickita + cuarzo + alunita + jarosita)

Los diagramas tipo hacker evidenció variaciones sistemáticas de los elementos mayores de las rocas alteradas, donde las tendencias lineales negativas del TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MnO , MgO y CaO y las positivas del Na_2O y K_2O de las muestras inalteradas son completamente difuminadas, mostrando para el caso del TiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO , Na_2O y K_2O un enriquecimiento con respecto al SiO_2 , solo el $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ mostró un empobrecimiento respecto al incremento del SiO_2 , este enriquecimiento y empobrecimiento demuestra la intensa movilidad elemental que existen en el CGH producto de la interacción agua/roca.

Mediante la clasificación de rocas por el diagrama de Winchester y Floyd (1977), se observó que las variaciones significativas se presentaron en rocas alteradas provenientes de fuentes activas, obedeciendo al grado de interacción agua/roca, presentando a su vez una composición con mayores tendencia acidas a la original.

El uso de los diagramas de multielemento permitió determinar la variación existente en elementos traza de las rocas alteradas con respecto a las inalteradas cogenéticas, donde las muestras alteradas presentan una tendencia a disminuir su concentración con el incremento de la incompatibilidad de elementos de Cs a Lu, mostrando anomalías negativas en Nb y positivas en Th, U, Pb y Zr en los elementos HFS, mientras que en los elementos LILE existen anomalías positivas Cs y anomalías negativas en Sr y Rb en muestra pertenecientes a fuentes activas, haciendo evidente la movilidad de elementos traza producto de la alteración hidrotermal.

Los diagramas normalizados de tierras raras mostraron patrones similares a las rocas inalteradas cogenéticas, sin embargo las muestras que presentó alteración argílica y silícica mostraron un patrón mayormente empobrecido, mientras que las rocas que presentaron alteración argílica avanzada solo se muestran empobrecidas a partir el praseodimio y solo algunas muestras presentaron enriquecimiento en La, Ce, Nd y Sm. Los cambios observados en REE obedecen al grado de interacción agua-roca y muy posiblemente al contenido de REE en los fluidos geotérmicos, mostrando una clara movilidad de REE en el CGH.

El balance de masas realizado a las tres zonas productoras identificadas dentro de la caldera Los Potreros, mostro para la zona norte constituida por depósitos piroclásticos con alteración que varía de argílica a argílica avanzada un enriquecimiento en Cu, Th, Mo, Bi, U, SiO_2 , Ti_2O , y Sr y empobrecimiento en Al_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Cr y Zn, mientras que la zona productora central constituida basaltos de olivino con alteración predominantemente argílica y argílica avanzada mostraron enriquecimiento en Bi, Th, Mo, As, Nb, Pb, Sr, Ba, Zn, Rb, S, SiO_2 y K_2O y empobrecimiento en Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MgO , MnO , CaO , Cr y Cu, finalmente la zona productora sur constituida por andesitas – basaltos que muestra mayormente

silicificación y argilización presento enriquecimiento en Rb, Th, Pb, Bi y S y empobrecimiento en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO, CaO, Nb, Cr, Cu, Zn, As y Mo.

La correlación bivariable realizada a las tres zonas productoras sugiere que los elementos que presentaron una mayor proporción de enriquecimiento en el análisis de balance de masas (SiO_2 , Th, Rb, Bi, y Sr) coinciden con los elementos de altos coeficientes de correlación, por lo contrario los elementos mayormente empobrecidos en el balance de masas (Al_2O_3 , Cr, Cu, Zn, CaO y Fe_2O_3) coinciden con los elementos de alto coeficiente de correlación negativa.

La distribución espacial de las anomalías elementales ocasionadas por la interacción agua-roca muestra patrones similares para los elementos enriquecidos (SiO_2 , Th, Rb, Bi, y Sr), los elementos empobrecidos (Al_2O_3 , Cr, Cu, Zn, CaO y Fe_2O_3) muestran tendencias más marcadas siguiendo las trazas de fallas existentes, estas observaciones espaciales son congruentes con las correlaciones bivariables realizadas en las zonas productiva y con dos de los tres sistemas estructurares principales que controlan el ascenso de fluidos definidos por Carrasco et al. (2015), el primero de ellos es el sistema de fallas de tendencia NW-SE dominadas por la falla Maztaloya, limitada hacia el sur del CGH y por último el sistema N-S, que es donde ocurre la principal actividad geotérmica activa. Por lo que el funcionamiento del campo geotérmico de Los Humeros y los planes para exploración adicional deben centrarse principalmente en el sistema de fallas de resurgimiento activo.

REFERENCIAS

- Andaverde, J., Verma, S. P. y Santoyo, E., 2004. Uncertainty estimates of static formation temperatures in boreholes and evaluation of regression models, *Geophysical Journal International*, v.160, pp. 1112-1122.
- Arnórsson, S., Sigurdsson, S., and Svavarsson, H., 1982. The chemistry of geothermal waters in Iceland. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.46, pp. 1513-1532.
- Arnórsson, S., Andrésdóttir, A., 1995. Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland, *Geochim. Cosmochim. acta* 59, pp. 4125-4146.
- Alemán-Nava, G., Casiano-Flores, V., Cárdenas-Chávez, D., Díaz-Chávez, R., Scarlat, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J., Parra, R., 2014. Renewable energy research progress in Mexico: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.32, pp.140-153.
- Armstead, H.C., 1983. *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*, Spon Press, 2nd edition, pp. 448.
- Armstead, H. C., 1989. *Energía Geotérmica*, Limusa, México, pp. 504.
- Ascencio, F., García, A., Rivera, J., y Arellano, V., 1994. Estimation of undisturbed formation temperatures under spherical-radial heat flow conditions, *Geothermics*, v.23, pp.317-326.
- Bakker, R.J., 2012, Thermodynamic modelling and purely empirical equations for H₂O-NaCl-KCl solutions. *Mineralogy and Petrology*, v. 105, pp. 1-29.
- Bau, M., 1991. Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium, *Chem. Geol.* v. 93, pp. 219-230.
- Barragán R. R., Nieva G. D., Santoyo E., González P. E., Verma P. M. López M. J., 1991. Geoquímica de fluidos del campo geotérmico de Los Humeros Pue. (México). *Geotermia Revista Mexicana Geoenergía*. v.7 (1) pp. 23-48.
- Barret, T. J., y McLean, W. H. 1991, Chemical, mass and oxygen isotope changes during extreme chloritization and sericitization of an Archean rhyolite, Noranda area, *Economic Geology*, v. 86, pp. 406-414
- Bernard, R., Taran, Y., Pennisi, M., Tello, E., Ramirez A., 2011, Chloride and Boron behavior in fluids of Los Humeros geothermal field (Mexico): A model based on the existence of deep acid brine, *Applied Geochemistry*, v. 26 (12), pp. 2064-2073.
- Bertani, R., 2015. *Geothermal Power Generation in the World 2010 - 2014 Update Report*, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Australia, pp. 19-25.
- Browne, P. R., Grahame, I. J., Parker, R.J., Wood, C.P., 1992. Subsurface andesite lavas and plutonic rocks in the Rotkawa and Ngaramariki geothermal systems, Taupo volcanic zone, New Zealand, *Journal Volcanology Geothermal*, v. 47, pp.149-159.
- Bustillo, M.A. y Bustillo, M., 1999. Los diagramas de isocon como método de estudio de cambios de masa y su aplicación a la génesis de silcretas, *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, v. 22-A, pp. 23-24.

- Canet, C., Franco, S.I., Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E., Villanueva-Estrada, R.E., 2011. A model of boiling for fluid inclusion studies: application to the Bolaños Ag–Au–Pb–Zn epithermal deposit, Western Mexico. *Journal of Geochemical Exploration* v.110, pp. 118–125.
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pie, T., Peláez B., Villanueva-Estrada, R., Pura, A., González-Partida E., Salinas S., 2015. Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico, *Geothermics*, v. 53, pp. 154–165.
- Campos-Enríquez, J.O. and Garduño, V.H., 1987. The shallow structure of the Los Humeros and Las Derrumbadas geothermal fields, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* v. 16, pp. 539–554.
- Campos, Enríquez, J.O. y Arredondo, F., 1992. Gravity study of Los Humeros caldera complex Mexico: structure an associated geothermal system, *Journal of Volcanology, Geothermal*, v. 51 pp. 199–215.
- Campos-Enríquez, J.O., Domínguez-Méndez, F., Lozada-Zumaeta, M., Morales-Rodríguez, H.F., Andaverde, J.A., 2005. Application of the Gauss theorem to the study of silicic calderas: The calderas of La Primavera, Los Azufres and Los Humeros (México), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 147(1–2), pp. 39–67.
- Carson, G. L., 2015. Hydrothermal Acid-sulfate Alteration at Krafla and Námafjall, Ne Iceland: Implications for Gusev Crater and Meridiani Planum, Mars, *Theses and Dissertations*, pp. 35–97.
- Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., López, M., Vargas, V., Aranda-Gómez, J.J., Cedillo, F. y Origel, G., 2008. Estudio de estratigrafía volcánica de la secuencia andesítica del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad. Informe Interno DEX-HT-19-08.
- Carrasco-Núñez, G., Arzate, J., Pablo-Bernal, J., Carrera, J., Cedillo, F., Dávila-Harris, P., Hernández, J., Hurwitz, S., Lermo, J., Levresse, G., López, P., Manea, V., Norini, G., Santoyo, E., Willcox, C., 2015. A New Geothermal Exploration Program at Los Humeros Volcanic and Geothermal Field (Eastern Mexican Volcanic Belt), *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, pp. 1–10.
- Castillo-Roman, J., Verma, SP., Andaverde, J., 1991. Modelling of temperature under the Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico, in terms of magma chamber depth, *GeoFIS. Internat.*, v. 30, pp. 149–172.
- Cedillo, F., Viggiano, J. y Gutiérrez-Negrín, L., 1994. Columnas Petrográficas de los Pozos Geotérmicos de Los Humeros, Informe Inédito CFE.
- Coaguila, N.D., Tangerino, H.F., Da Silva, Y., Goncalvez, F.D., 2013. Análisis comparativo de método de interpolación espacial utilizando datos de evapotranspiración, XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, pp. 4080–4085.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2015. Informa anual 2015, Recuperado de <http://www.cfe.gob.mx>
- Coelho, J., 2006. GEOISO—a Windows™ program to calculate and plot mass balances and volume changes occurring in a wide variety of geologic processes, *Computers and Geosciences*, v.32, pp. 1523–1528.
- Davila-Harris P., y Carrasco-Núñez Gerardo., 2014, An unusual syn-eruptive bimodal eruption: The Holocene Cuicuiltic Member at Los Humeros caldera, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* v. 271, pp. 25–27.

- Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación, *Revista Instituto de Geología*, v. 2, pp. 172-187.
- Dickin, A.P., 1981. Hydrothermal leaching of rhyolite glass in the environment has implications for nuclear waste disposal, *Nature*, v.294, pp.342 – 347.
- Cruz-Pérez, M., Canet, C., Franco, S., Camprubí, A., Gonzalez-Partida, E., Rajabi, A., 2016. Boiling and depth calculations in active and fossil hydrothermal systems: A comparative approach based on fluid inclusion case studies from Mexico, *Ore Geology Reviews* v. 76, pp. 603-611.
- De la Cruz Martínez, V., 1983. Estudio geológico a detalle de la zona geotérmica de Los Humeros, Pue. CFE, internal report No. 10-83. Unpublished.
- Dickson, M.H., and Fanelli, M., 2005. *Geothermal Energy: Utilization and Technology*, Earthscan Publications Ltd., p. 226.
- Ellis, A. J., 1963. Solubility of calcite in sodium chloride solution at high temperatures, *American Journal of Science*, v. 261, p. 259-267.
- Espinoza, O. M., 2007. Evaluación de métodos analíticos para la estimación de temperaturas estabilizadas en pozos geotérmicos, Tesis de maestría, Centro de Investigación de Energía, pp. 27-57.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican volcanic belt: *Geology*, v. 27, pp. 303-306.
- Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Trans-Mexicana durante la última década, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 53, pp. 84-92.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, Ma. T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, v. 522-523, pp.122-149.
- Ferrari, L., 2013. Energía finita en un planeta finito. *Revista Digital Universitaria*. v. 14 (9), art. 30.
- Ferriz, H., Mahood, G., 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico, *Journal of Geophysical Research*, v. 89, pp. 8511-8524.
- doi:10.1029/JBo89iB10p08511**
- Ferriz, H., 1985. Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de Los Humeros, Puebla, México, *Geof. Int.*, v. 24 (1), pp. 97-157.
- Fleischer M., 1978. Relative proportions of the lanthanides in minerals of the bastnasite group, *Canadian Mineralogist*, v. 16, pp. 361–363.
- Flores-Armenta, M., Ramírez-Montes, M., Sandoval-Medina, F., y Rosales-López, C., 2011. Resultados de la prueba de neutralización de fluidos ácidos en el pozo H-43, campo geotérmico de Los Humeros, Pue., *Geotermia*, v.24 (2), pp.32-38.
- Fournier, R.O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems, *Geothermics*, v. 5, pp. 41-50.

- Garduño Monroy, V.H., F. Romero Ríos y R. Torres Hernández, 1985. Análisis estructural del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE internal report number 26-85. Unpublished
- Gary, M., McAfee, R., Jr., and Wolf, C. L., 1974. Glossary of geology: Washington, D. C., American Geologist Institute., pp. 374
- Geotermia en México, (s.f). Recuperado el 02 agosto de 2016, de <http://www.cemiegeo.org/>
- González-González, M.A., 2009. Geotermia como alternativa energética en México, ¿es realmente viable?, Bol-e, pp.7.
- Gómez-Tuena, A., Langmuir, C.H., Goldstein, S.L., Straub, S.M., Ortega-Gutiérrez, F., 2007a. Geochemical evidence for slab meeting in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Petrology* v.48, pp.537–562.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., 2007b. Igneous Petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In: Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F. (Eds.), *Geology of México: celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper*, v.422, pp. 1–53
- González-Partida, E., 1985. Etude métallogénique de la partie Centre-Occidentale du Mexique, these de doctorat, These de Doctorat D'Etat Institut National Polytechnique de Lorraine, France, pp. 210.
- González-Partida, E., Barragán, R.M., Nieva, D., Quijano, J.L., López, J.M., Gutiérrez, P. H., 1991. Estudio de inclusiones fluidas en cuatro pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, *Geotermia*, v. 7, pp. 201–229.
- González-Partida, E., e Izquierdo G. M., 1996. Estudios petrográficos, inclusiones fluidas y difracción de rayos-X, para las muestras y ripios de barrena de los pozos H-38, H-39 H-40 de Los Humeros, Pue. Informe Interno s/n del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Inédito.
- González-Partida, E., Birkle, P. y Torres-Alvarado. 2000 a. Evolution of the hydrothermal system at the geothermal field of Los Azufres México based on fluid inclusions, isotopic and petrologic. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 104, pp. 277-296.
- González-Partida, E., Tello Hinojosa, E. y Verma, Pal. 2000 b. Análisis geoquímico e isotópico de aguas geotérmicas y manantiales para definir el estado de equilibrio agua-roca del reservorio de los Azufres, Mich., México. *Ingeniería Hidráulica en México*, v. 15 (3), pp. 89-99.
- González-Partida, E., Tello Hinojosa, E. y Verma Pal. 2001. Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de Los Humeros Puebla México. *Ingeniería Hidráulica en México*, v. 16 (2), pp. 185-194.
- González-Partida, E., Carrillo-Chávez, Levresse, G., Tritlla, J., Tello-Hinojosa, E., Venegas-Salgado, S., Ramírez-Silva, G., M. Verma Pal, and Camprubi, A. 2005. Hydro-geochemical and isotopic fluid evolution of the los Azufres Geothermal field, Central México. *Applied Geochemistry*, v. 20, pp. 23-39.
- González-Partida, E., Pérez R., Tinoco J., 2009. Modelado numérico del equilibrio termodinámico entre fases fluidas y minerales presentes en el subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros. Informe Interno, CFE. Inédito.
- González-Ruiz, L.E., González-Partida, E., Garduño-Monroy, V.H., Martínez, L., Pironon, J., Díaz-Carreño, E-H., Yáñez-Dávila, D., Romero-Rojas, W., Romero-Rojas, M.C., 2015. Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica, *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, pp. 1-8.

- Grant, J.A., 1986. The Isocon Diagram - A Simple Solution to Gresens' Equation for Metasomatic Alteration, *Economic Geology*, v. 81, pp. 1976-1982.
- Grant, J.A., 2005. Isocon analysis: A brief review of the method and applications, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 30 (17-18), pp. 997-1004.
- Gresens, R.L., 1967. Composition - volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology* v. 2, pp. 47-65.
- Gutiérrez-Negrín, L., 1982. Litología y Zoneamiento hidrotermal en los pozos H-1 y H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, Informe interno de C.F.E., pp. 23-82.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2007. 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico, 2007 Annual Meeting GRC, Sparks, Nevada, pp. 11.
- Gutiérrez-Negrín L., e Izquierdo-Montalvo G., 2010. Review and Update of the Main Features of the Los Humeros Geothermal Field, Mexico, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, pp. 25-29.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure, *Economic Geology*, v.66, pp. 940-946.
- Hall, G., Bonham-Carte, G., Buchar, A., 2014. Evaluation of portable X-ray fluorescence (pXRF) in exploration and mining: Phase 1, control reference materials, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 14 (2) pp. 99-123.
- Hanson G.N., 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems. *Annu Rev Earth Planet Sci* v. 8 pp. 371-406.
- Hasenaka, T., Carmichael, I., 1985. The cinder cones at Michoacán - Guanajuato, central Mexico: their age, volume, distribution, and magma discharge rate, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 25, pp. 105-124.
- Hasan, A.R. y Kabir, C.S., 1994. Static reservoir temperature determination from transient data after mud circulation, *SPE Drill, Completion*, pp. 17-24.
- Haas, J. R., Shock, E. L., y Sassani, D. C., 1995. Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures, *Geochim. Cosmochim. Acta* v.59, pp. 4329-4350.
- Hauff, P.L., 1994. *Applied Reflectance Spectroscopy with emphasis on data collection and data interpretation using the PIMA-II SWIR Spectrometer*, Spectral International Inc., Arvada, Colorado pp. 600.
- Hedenquist, J., Henley, R., 1985. The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluids inclusions: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition, *Economic Geology* v.80, pp. 1379-1406.
- Heim, A., 1926. Notes on the Jurassic of Tamazunchale (Sierra Madre Oriental, México). *Eclogae Geol. Helvetiae*, v. 20 (1), pp. 84-87.
- Hiriart L. B. G. y Gutiérrez-Negrín L. C. A., 2003, Main aspects of geothermal energy in Mexico, *Geothermics*, v. 32, (4-6), pp. 389-396.

- Hiriart, L.B.G., Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Quijano-León, J.L., Ornelas-Celis, A., Espíndola, S., and Hernández, I., 2011. Evaluación de la Energía Geotérmica en México. In: Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, D.F., México, pp. 167.
- Horner, D.R., 1951. Pressure build-up in wells, in Proc. 3rd World Petroleum Congress, The Hague, The Netherlands, pp. 503–519.
- Humphris, S.E., y Thompson, G., 1978. Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.42, pp.127-136.
- Iglesias, E.R., Torres, R.J., 2003. Low- to medium-temperature geothermal reserves in Mexico: A first assessment. *Geothermics*, v. 32, pp. 711-719,
- Izaguirre, A., Iriondo, A., Caballero-Martínez, J. A., Moreira-Rivera, F., Espinoza-Aramburú, E., 2012. Homogeneidad geoquímica de la alteración hidrotermal del cinturón de oro orogénico del NW de Sonora, México: Estudio de balance de masas en rocas encajonantes de la mineralización, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 64 (1), pp. 119-153.
- Izquierdo, G., 1993. Difracción de rayos X en la caracterización de especies arcillosas: un caso de aplicación en el pozo H29 del campo de Los Humeros, Puebla, México. *Geofís. Int.*, v.32, pp. 321–329.
- Izquierdo G, Arellano V. M. y Aragón A., 2008. Características mineralógicas y microtermométricas del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue., México, *Geotermia*, v. 21 (2), pp. 2-10.
- Ishikawa Y., Sawaguchi T., Iwaya S., Horiuchi M., 1976. Delineation of prospective targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos, *Mining Geol.*, v.26 pp. 105–117.
- Jeffreys, G., 1910, Reporte Geológico de la American Gulf Oil Company. Reporte no publicado, in Muir, 1936.
- Kaasalainen, H., & Stefansson, A., 2011. Sulfur speciation in natural hydrothermal waters, Iceland, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 75, pp. 2777-2791.
- Kaasalainen, H., Stefansson, A., Giroud, N., Arnórsson, S., 2015. The geochemistry of trace elements in geothermal fluids, Iceland, *Applied Geochemistry*, v. 62, pp. 207-223.
- Krige, D. G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand, J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa, v. 52 (6), pp.119-139
- Kelepertsis, A.E., Esson, J., 1987. Major- and trace-element mobility in altered volcanic rocks near Stypsi, Lesbos, Greece and genesis of a kaolin deposit, *Appl. Clay Sci.*, v. 2, pp. 11–28.
- Le Bas, M.J., Lemaitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic-Rocks Based on the Total Alkali Silica Diagram, *Journal of Petrology* v. 27 (3), pp. 745-750.
- López-Moro, J. F., 2012. EASYGRESGRANT—A Microsoft Excel spread sheet to quantify volume changes and to perform mass-balance modeling in metasomatic systems, *Computers & Geosciences*, v.39, pp.191–196.
- Lottermose, B. G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes, *Ore Geology Reviews*. 7, pp. 25–41.

- Lozano, R., Verma, S.P., Girón, P., Velasco-Tapia, F., Morán-Zenteno, D., Viera, F., Chávez, G., 1995. Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas, *Actas INAGEQ*, 1, pp. 203-208.
- Lozano, R., Bernal J. P., 2005. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22 (3), pp. 329-344.
- Mauriohooho, k., Barker, S. L. L., Rae, A., 2016. Mapping lithology and hydrothermal alteration in geothermal systems using portable X-ray fluorescence (pXRF): A case study from the Tauhara geothermal system, Taupo Volcanic Zone, *Geothermics*, v. 64, pp. 125–134.
- Markússon, S. H., y Stefánsson, A., 2011. Geothermal surface alteration of basalts, Krýsuvík Iceland—Alteration mineralogy, water chemistry and the effects of acid supply on the alteration process, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 206, l. 1–2, pp. 46–59.
- Massachusetts Institute of Technology, MIT, 2006. *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. MIT, USA, pp. 372.
- Martínez-Serrano, R.G., 1993. Caractérisation minéralogique, géochimique et isotopique du Champ géothermique de Los Humeros, Mexique. Interactions Fluide roche dans un Système à Fluide mixte (eau-vapeur), PhD thesis, INPL-CNRS, Nancy, France.
- Martínez-Serrano, R.G., y Alibert-Chantal., 1994. Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración, *Geofísica Internacional*, v.33 (4), pp. 585 – 605.
- Martínez-Serrano, R.G. and Dubois., 1998. Chemical variations in chlorite at the Los Humeros Geothermal System, Mexico, *Clays and Clay Minerals*, v.46, pp. 615–628.
- Martínez-Serrano, R.G., 2002. Chemical variations in hydrothermal minerals of the Los Humeros geothermal system, Mexico, *Geothermics* v. 31 (5), pp. 579–612.
- Martínez, J. C. y Dristas J. A., 2007. Paleoactividad hidrotermal en la discordancia entre el complejo Buenos Aires y la Formación La Tinta en el area de Barker, Tandilia, *Revista de la Asociación Geológica Argentina* v. 62 (3), pp. 375-386.
- Michard, A., Albaréde, F., Michard, G., Minster, J.F., Charlou, J.L., 1983, Rare–earth elements and uranium in high–temperature solutions from East Pacific Rise hydrothermal vent feld, *Nature*, v.303, pp. 795–797.
- Michard, A., 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.53 pp. 745–750.
- Morí, L., Gómez-Tuena, A., Caib, Y., Goldsteinb, S., 2007. Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt, *Chemical Geology*, v. 244 (3–4), pp. 452–473.
- Moller, P., 1998. Rare earth elements and yttrium fractionation caused by fluid migration, *Journal of the Czech Geological Society*, v. 42 (3), pp. 43
- Mukherjee, P. K. y Gupta, P. K., 2008. Arbitrary scaling in ISOCON method of geochemical mass balance: An evaluation of the graphical approach, *Geochemical Journal*, v. 42, pp. 247-253.

- Murillo D., Ortega, I., Carrillo, J., Pardo, A., Redón, J., 2012. Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos, *Ing. USBMEd*, v. 3 (1), pp. 62-68
- Negendank, J.F.W., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., Werle, D., 1985. Geological and geochemical investigations on the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geof. Inter. V. 24 (4)*, pp. 477-575.
- Nesbitt H.W., Young G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutitas, *Nature*, v.299 pp. 715-717.
- O'Hara, K., 1990. State of strain in mylonites from the western Blue Ridge province, southern Appalachians: the role of volume loss, *Journal of Structural Geology*, v.12, pp. 419-430
- Ordaz Méndez, C.A., Flores Armenta, M., y Ramírez Silva, G., 2011. Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, v. 24-1, pp. 50-58.
- Pandarath, K., Dulski, P., Torres-Alvarado, I., Verma, S., 2008. Element mobility during the hydrothermal alteration of rhyolitic rocks of the Los Azufres geothermal field, Mexico, *Geothermics*, v. 7 (1), pp. 53-72.
- Parr, J.M., 1992, Rare-earth element distribution in exhalites associated with Broken Hill-type mineralisation at the Pinnacles Deposit, New South Wales, Australia: *Chemical Geology*, v.100, pp.73-91.
- Pearce, J. S., y Can, J. R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analysis, *Earth Planet, Science Lett.*, v. 19, pp. 290-300
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R.S. (Ed.), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Wiley, Chichester, pp. 525-548.
- Pérez, A. y Callejas, J.L., 2011. Memoria del estudio geotérmico de la provincia de Granada, Tesis de Maestría, Universidad de Granada, España, pp. 5.
- Pilar Martínez, A., 2015. Caracterización petrográfica y geoquímica de una sección del subsuelo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla: el caso del pozo h-42, Universidad Autónoma de Guerrero, Tesis de Licenciatura, pp. 47-77.
- Pirajno F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*, ed. Springer, Geological Survey of Western, Australia, pp. 143-150
- Potdevin, J.L., 1993. Gresens g2: a simple Macintosh program of the Gresens method. *Computers and Geosciences*, v.19, pp. 1229-1238.
- Proh-Ledesma, R. M., 1986. *El calor de la Tierra*. Fondo de Cultura Económica, S.E.P., pp. 99.
- Proh-Ledesma, R. M., and Browne, P.R.L., 1989. Hydrothermal alteration and fluid inclusion geothermometry of Los Humeros geothermal field, Mexico, *Geothermics*, v. 18 (5/6), pp. 677-690.
- Proh-Ledesma, R.M., 1991. Terrestrial heat flow in Mexico, in: Cremák, V., Rybach, L. (Eds.), *Exploration of the Deep Continental Crust*. Springer-Verlag Berlin, pp. 475-485.
- Proh-Ledesma, R.M., 1998. Pre- and post-exploitation variations in hydrothermal activity in Los Humeros geothermal field, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 83, pp. 313-333.
- REN21's., 2015, *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2015 Global Status Report*, Paris, Francia, pp. 21-51.
- REN21's., 2016, *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2015 Global Status Report*, Paris, Francia, pp. 22-53.

- Reyes, E. D., 1964, El Jurásico Superior del área de Tamán, S. L. P. Petróleos Mexicanos, Zona Norte. Informe Geológico No. 508, inédito.
- Rodríguez-Díaz, A. (cand. a Dr.), Re: Análisis de SWIR Yañez-Dávila (correo electrónico), 10 de agosto del 2015, geaard@hotmail.com, comunicación personal.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusion, Min. Soc. Amer., Reviews in Mineralogy, pp. 12-64.
- Rollinson, H., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, edit. Routledge, pp. 15.
- Rubin, J.N., Henry, C.D., Price, J.G., 1993. The mobility of zirconium and other "immobile" elements during hydrothermal alteration, Chem. Geol., v. 110, pp. 29-47.
- Rubinstein, N., Gómez, A., y Kleiman L., 2013. Caracterización litofacial y geoquímica de las volcanitas del área del distrito minero El Infiernillo, Mendoza, Revista de la Asociación Geológica Argentina v. 70 (3), pp. 382-389.
- Sánchez-Guzmán, J., Sanz-López, L. y Ocaña-Robles, L., 2011. Evaluación del potencial de la energía geotérmica, estudio técnico 2011-2020, España, pp. 26.
- Santoyo, E., García, A., Espinosa, G., Hernández, I. & Santoyo, S., 2000. STATIC TEMP: a useful computer code for calculating static formation temperatures in geothermal wells, Comput. Geosci., v.26, pp. 201-217.
- Santoyo, E., y Torres, I., 2010. Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable, Revista Digital Universitaria, Centro de Investigación en Energía, UNAM, v.11 (10), pp. 3-25.
- Santoyo, E., Guevara, M., Pérez-Zarate, D., 2015. Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios en el tema de energía geotérmica". Editado por el Centro Mario Molina, la Secretaria de Energía de México (SENER), pp. 14.
- Scott, S., Gunnarsson, I., Arnórsson, S., Stefánsson, A., 2014. Gas chemistry, boiling and phase segregation in a geothermal system, Hellisheidi, Iceland, Geochimica et Cosmochimica Acta, v.124, pp.170-189.
- Smith, M. P., Henderson, P., y Campbell, S., 2000. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: Constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China, Geochimica et Cosmochimica Acta, v.64, (18), pp. 3141-3160.
- Stephenson, L. W., 1922. Some Upper Cretaceous Shells of the Rudistid Group from Tamaulipas, Mexico, Proc. U. S. Nat. Hist. Mus., art. 1, no. 2422, pp. 61.
- Stefansson, V. 1981. The Krafla geothermal field, north-east Iceland, In: L. Rybach and L.J.P. Muffler (eds) Geothermal Systems: Principles and Case Histories. Wiley, New York, N.Y. pp. 273-294.
- Stefansson, A., Gislason, S.R., Arnórsson, S., 2001. Dissolution of primary minerals in natural waters II: Mineral saturation state, Chemical Geology, v. 172, pp. 251-276.
- Sun, S.S. y McDonough W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes, Magmatism in ocean basins, Geological Society of London, Special Publication, v. 42, pp. 313-345.
- Taylor, R.P. and Fryer B.J., 1982. Rare earth element geochemistry as an aid to interpreting hydrothermal ore deposits, Mineralisation associated with acid magmatism, pp. 357-365.
- Taylor, R.P. and Fryer B.J., 1983. Rare earth element litho-geochemistry of granitoid mineral deposits, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Bulletin v. 76, pp. 74-84.

- Tello-Hinojosa, E., 1991. Composición química de la fase líquida a descarga total y a condiciones de reservorio de pozos geotérmicos de Los Humeros, Puebla, México, *Geofísica Internacional*, v.31 (4), pp. 383-390.
- Tello-Hinojosa, E., 1992. Características geoquímicas e isotópicas de los fluidos producidos por los pozos de Los Humeros, Puebla, *Geotermia* v. 8, pp. 3-48.
- Tello-Hinojosa E., Verma, S. P., Tovar, R. A., 2000. Origin of acidity in the Los Humeros, México, geothermal reservoir, *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, pp. 2959-2967.
- Tello-Hinojosa E., 2005. Estado de equilibrio soluto-mineral y saturación de minerales de alteración en sistemas geotérmicos, Tesis de Doctorado-UNAM-DEPFI, pp. 19-68.
- Tinoco-Michel, J. A., 2008. Desarrollo de un modelo termodinámico para mitigar la acidez del sistema actual del campo geotérmico de los Humeros, Puebla, México, Tesis de Maestría, UNAM, campus Juriquilla, Centro de Geociencias, pp. 7-30.
- Thompson, A.J.B., Hauff, P.L., Robitaille A.J., 1999. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy, *Soc. Econ. Geol. Newsl.*, v. 39, pp. 16-27
- Tobler W., 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography*, v.46 (2), pp.234-240.
- Vásquez Oliva, R., Palomino Colona, C. G., Chira Fernández, J. E., & Guillén Gómez, M., 2010. Anomalías geoquímicas secundarias negativas y positivas de rocas sedimentarias siliciclásticas cretáceas en el Perú central. *Sociedad Geológica del Perú – SGP*, pp. 900-903
- Verma, S., y López, M., 1982. Geochemistry of Los Humeros Caldera, Puebla, México, *Bull. Volcanol.*, v. 45 (1), pp. 63 – 69.
- Verma, S.P., 1983. Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, México—Nd and Sr isotope data, *Nature*, v. 301, pp. 52–55.
- Verma, S.P., 1984. Alkali and alkaline earth element geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 20, pp. 21-40.
- Verma, S., Lozano-Santa, C. R., Girón, P., Velasco-Tapia, F., 1996. Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos traza en rocas ígneas, *Actas INAGEO* 2, pp. 237-242.
- Verma, S., 2001. Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Aocolco caldera, eastern Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, v.43, pp. 31-51.
- Viggiano, J.C., Robles, J., 1988a. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Parte I: Sus usos como indicadora de temperatura y del régimen hidrológico, *Geotermia, Rev. Mex.* v. 4, pp. 15–28.
- Viggiano, J.C., Robles, J., 1988b. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Parte II: Geometría del yacimiento, *Geotermia, Rev. Mex.* v. 4, pp. 29–40.
- Viggiano-Guerra, J.C., and Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1995. Comparison between two contrasting geothermal fields in Mexico: Los Azufres and Los Humeros, *Proceedings of the World Geothermal Congress*, v. 3, pp. 18-31.
- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F., 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo, *Agronomía Costarricense*, v. 32 (1), pp. 95-105.
- Viniegra, O., 1965. Geología del Macizo de Teziutlán y de la Cuenca Cenozoica de Veracruz, *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 17 (7-12), pp. 100-135.
- Yañez, G., 1980, Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros – Derrumbadas, Estado de Puebla y Veracruz, Informe interno de C.F.E, pp. 59.

- Yañez García. C. y García Duran S., 1982. Exploración de la región geotérmicas Los Humeros-Las Derrumbadas, estado de Puebla y Veracruz, Comisión Federal de Electricidad, pp. 97.
- Winchester, J.A. y Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, *Chemical Geology*, v. 20, pp. 325-343.
- Wilkinson, J.J., 2012. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, v. 55, pp. 229-272.

ANEXOS I

Tabla 19. Valores de calibración del equipo de ED-FRX. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

	IGLs-1	IGLd-1	IGLc-1	IGLa-1	IGLsy-1	IGLsy-2	IGLgb-3	IGLsy-4
Elementos Mayores (w/w %)								
Reportado SiO₂	1.74	0.07	60.52	52.15	57.99	38.73	54.99	
60s	1.13	0.06	48.72	45.78	47.14	30.28	46.08	
Calibrado	1.60	0.32	58.96	55.41	57.04	36.74	55.77	
Reportado TiO₂	2.70		1.08	0.50	1.01	3.82	1.68	
60s	2.37		0.90	0.38	0.80	3.78	1.54	
Calibrado	2.53		1.08	0.57	0.98	3.93	1.72	
Reportado Al₂O₃	24.39		17.39	21.68			19.56	
60s	13.54		9.41	12.27			11.14	
Calibrado	23.75		16.65	21.57			19.62	
Reportado Fe₂O₃	12.99		6.12	4.19	3.91	14.48	5.56	
60s	12.89		5.28	4.19	3.46	14.28	5.16	
Calibrado	13.12		5.67	4.61	3.89	14.48	5.55	
Reportado MnO	0.27		0.10			0.16	0.15	
60s	0.30		0.07			0.17	0.16	
Calibrado	0.28		0.10			0.18	0.17	
Reportado MgO	18.59			0.32		6.11	1.64	
60s	5.27			0.66		2.48	0.61	
Calibrado	19.70			2.01		8.98	1.81	
Reportado CaO	0.38	33.77	55.22	5.18	2.47	2.29	12.41	4.39
60s	0.38	41.27	67.68	5.55	2.78	2.38	14.18	5.01
Calibrado	0.80	33.96	55.37	4.99	2.75	2.42	12.00	4.56
Reportado K₂O	0.61		2.14	5.90	5.47	1.03	3.08	
60s	0.61		1.85	5.52	4.61	1.06	2.96	
Calibrado	0.60		2.01	6.17	5.15	1.11	3.27	
Reportado P₂O₅	0.14					0.11	1.53	0.49
60s	0.37					0.30	1.84	0.64
Calibrado	0.17					0.10	1.53	0.42

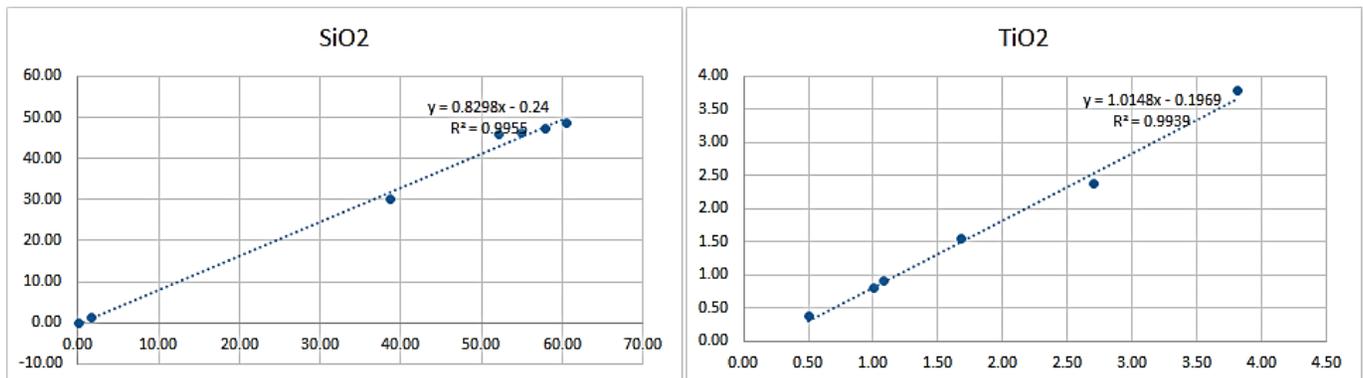


Figura 45. Curvas de calibración de los elementos Mayores (w/w %)

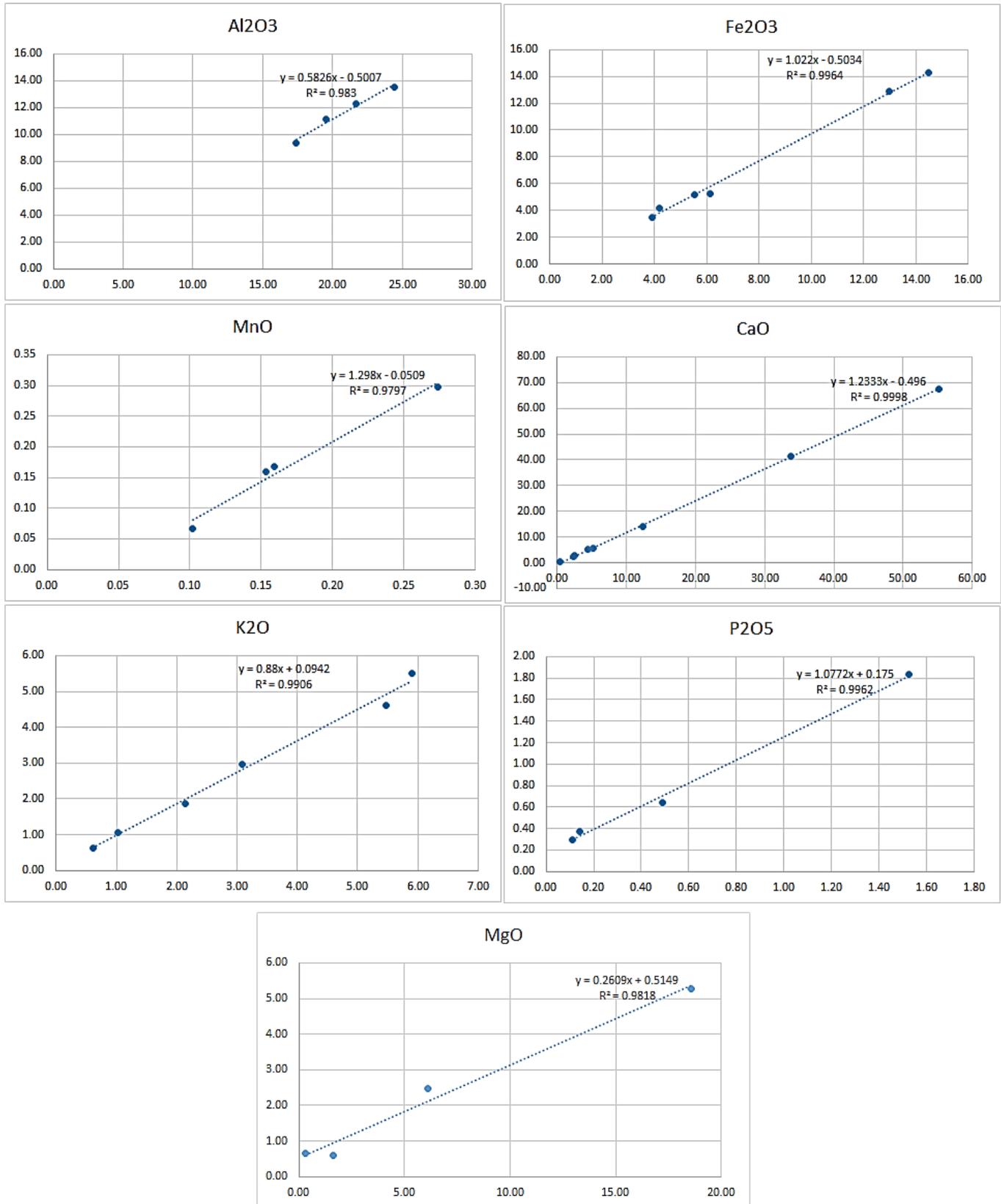
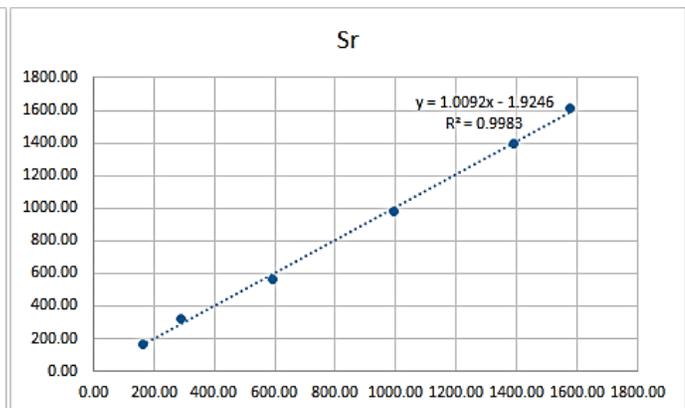
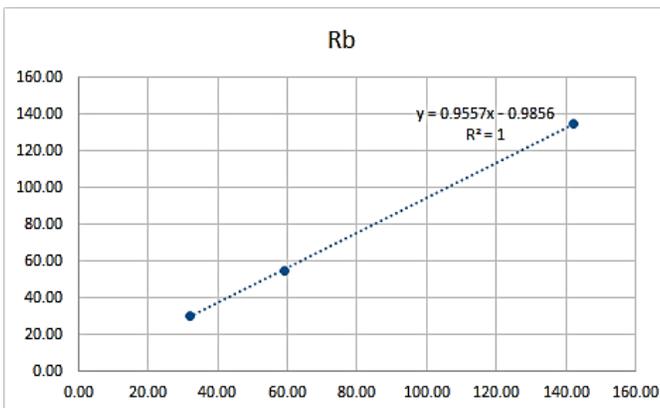


Figura 45. Curvas de calibración de los elementos mayores (w/w %) El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Tabla 20. Valores de calibración del equipo de ED-FRX.

	IGLs-1	IGLd-1	IGLc-1	IGLa-1	IGLsy-1	IGLsy-2	IGLgb-3	IGLsy-4
Elementos Traza ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)								
Reportado Rb				32.00		142.00		59.00
60s				29.82		134.79		55.10
Calibrado				32.30		142.01		58.72
Reportado Sr	164.00	290.00	592.00	1578.00	992.00			1391.00
60s	167.59	320.67	563.83	1615.85	979.54			1393.92
Calibrado	164.14	315.82	556.77	1599.20	968.69			1379.29
Reportado Ba				2391.00	2422.00	592.00		13731.00
60s				764.28	975.26	338.21		5348.03
Calibrado				1967.00	2510.34	869.73		13771.66
Reportado Zr				224.00	361.00	464.00		153.00
60s				252.39	428.08	558.11		184.55
Calibrado				217.38	361.68	468.47		161.67
Reportado Nb				20.00		217.00	38.00	65.00
60s				14.33		143.87	30.24	49.36
Calibrado				17.60		218.38	42.26	71.89
Reportado V	293.00	8.00	3.00	97.00		44.00		439.00
60s	516.30			141.05		93.25		810.31
Calibrado	292.80			90.24		64.44		451.50
Reportado Cr	267.00			27.00		12.00		
60s	424.67			169.42		162.89		
Calibrado	261.28			16.51		10.24		
Reportado Cu	58.00				20.00			47.00
60s	48.36				16.41			45.18
Calibrado	54.91				18.73			51.31
Reportado Zn			2.00	74.00	106.00	89.00		
60s			11.00	67.11	116.27	88.85		
Calibrado			5.74	64.14	115.30	86.76		
Reportado Th					41.00	29.00		6.00
60s					41.17	27.43		8.14
Calibrado					42.26	27.48		6.73
Reportado Pb				11.00	20.00	14.00		
60s				12.63	23.67	13.11		
Calibrado				12.77	21.24	13.14		



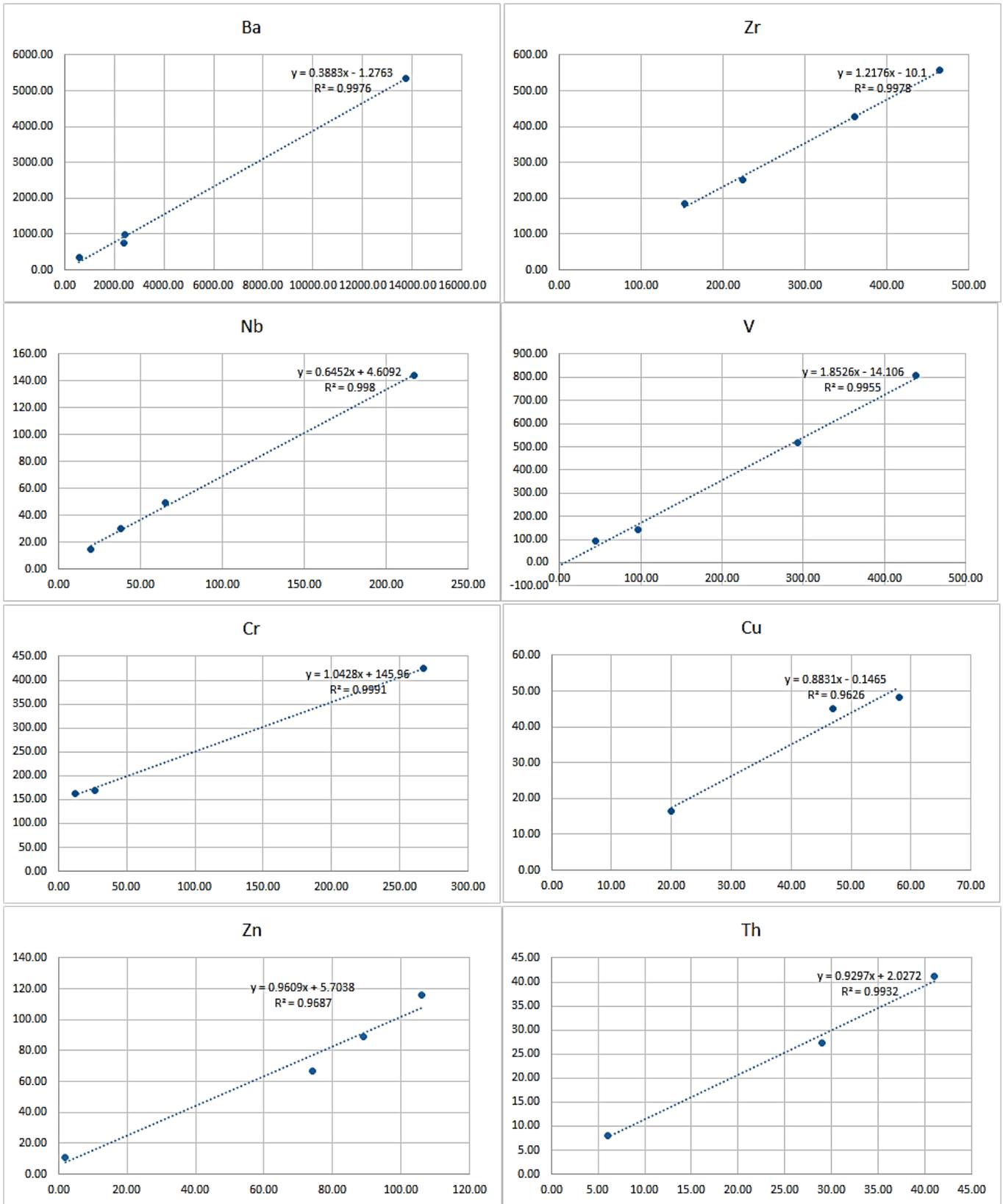


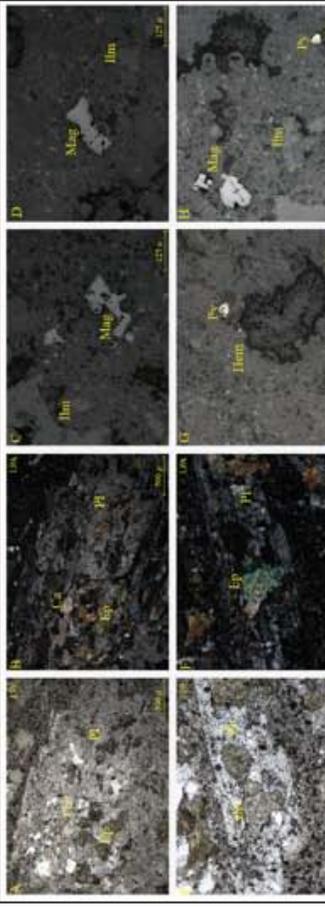
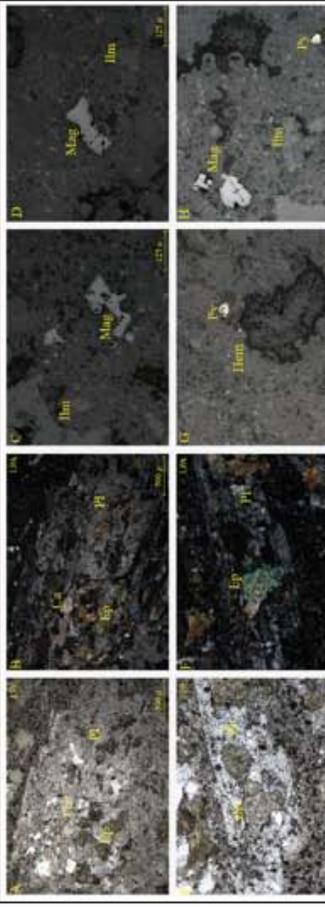
Figura 46. Curvas de calibración de los elementos traza ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

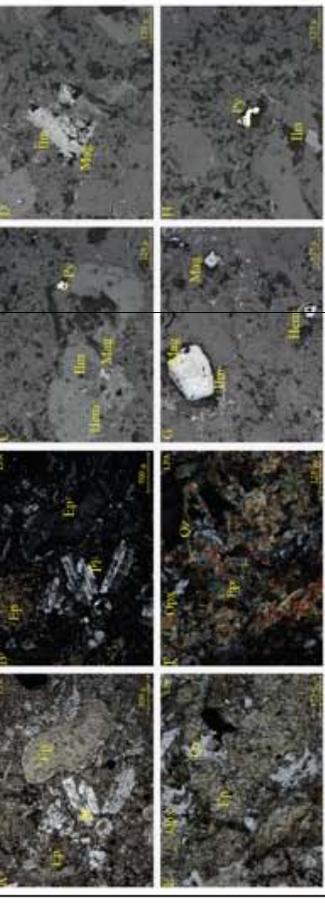
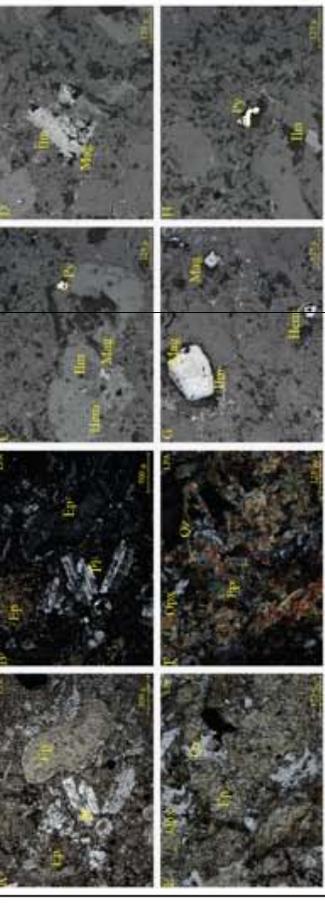
ANEXOS II

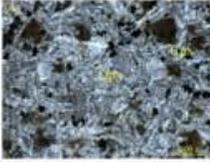
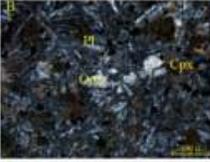
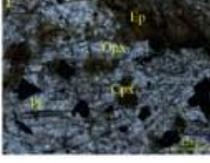
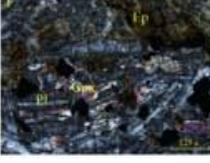
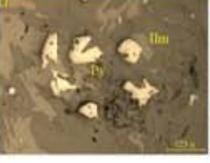
Tabla 21. Fichas petrográficas de diversos pozos del CGH.

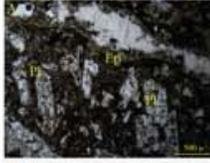
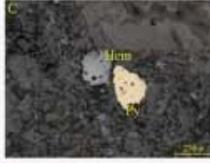
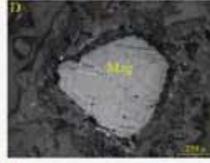
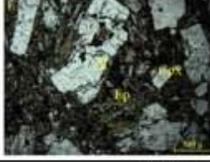
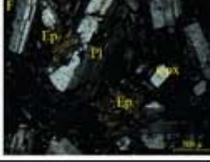
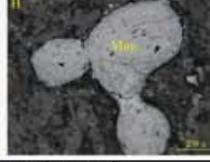
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-1 (H-5)		Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.	
Profundidad: 325m	Coordenadas:	Norte: 2175950	Este: 660540
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Incoloro - Gris	Tamaño de cristal:	> 10 μ <50 μ
Textura:	Microlítica ofítica	Forma Cristalina	Alotriomorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} orden y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Anhedral	Estructuras:	Fracturas y clastos
MINERALOGÍA :			
Transparentes		Secundarios Transparentes	
Primarios opacos			
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Primarios opacos
Plagioclasas 60 % (Albita) Ortopiroxeno 15 % (Enstatita) Clinopiroxeno 5 % (Augita)	Cuarzo 5 % Biotita 1 %	Calcita 1 % Sericita	Neoformados Hematita 2.5 % Pirita 0.5 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Toba cristalina		
Alteración : Sericitica	Oxidación: Débil (He)		
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
Fecha: 13/01/2015		Petrografo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila	

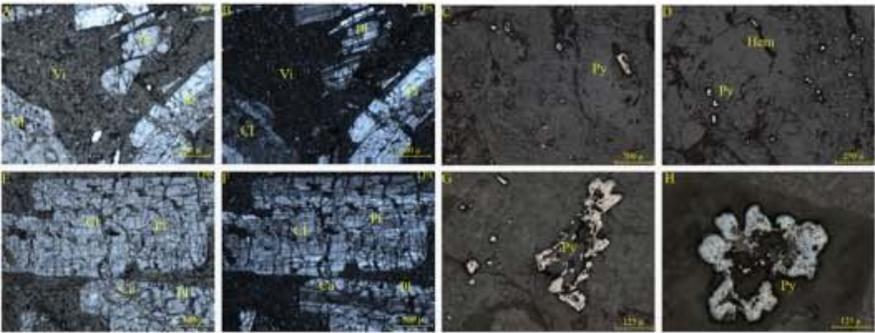
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-2(H-23)		Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.	
Profundidad: 1201m	Coordenadas:	Norte: 2175459	Este: 664184
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris oscuro	Tamaño de cristal:	> 50 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidomorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} orden
Forma del cristal	Sub- euhedral	Estructuras:	Reemplazamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes		Secundarios Transparentes	
Primarios opacos			
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Primarios opacos
Plagioclasas 70 % (Albita) Feldespato alcalino 10 % (Sanidina) Clinopiroxeno 5 % (Augita) Vidrio Volcánico 5 %	Cuarzo 3 % Biotita 1 %	Calcita 3 %	Ilmenita 0.5 % Magnetita 2.0 % Neoformados Hematita 0.5 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : No presenta	Oxidación: Débil (Mag + Ilm + He)		
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
Fecha: 13/01/2015		Petrografo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila	

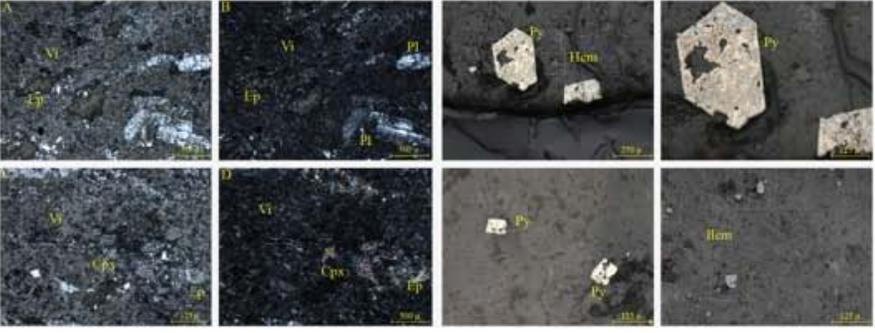
DATOS DE CAMPO	
Muestra: GH-3 (H-23)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.
Profundidad: 1925m	Coordenadas: Norte: 2175459 Este: 664184
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA	
Color:	Gris claro - verde
Textura:	Porfídica
Cristalinidad:	Hipocristalina
Forma del cristal	Anhedral
MINERALOGÍA :	
Transparentes	Secundarios Transparentes
Esenciales	Accesorios
Plagioclasas 70 % (Albita)	Cuarzo 7 % Biotita 0.5 %
Vidrio volcánico 10% Ortopiroxeno 3 % (Enstatita)	Epidota 10 % Calcita 2 %
	Primarios opacos
	Ilmenita 1 % Magnetita 2.0 % Neoformados Hematita 2.5 % Pirita 0.5 %
CLASIFICACIÓN	
Nombre de la roca:	Andesita
Alteración : Propilítica moderada (Ep + Ca)	Oxidación: Débil (He + Mag + ilm)
REGISTRO FOTOGRÁFICO	
	
Fecha: 13/01/2015	Petrografía: Erik Hugo Diaz Carreño David Yáñez Dávila

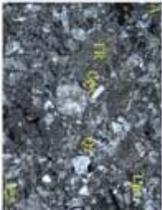
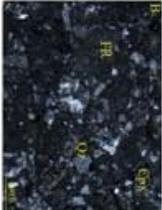
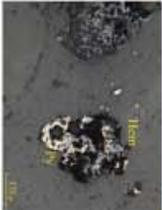
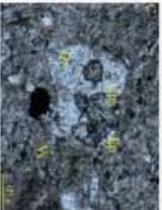
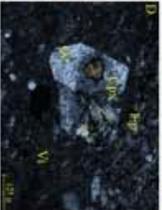
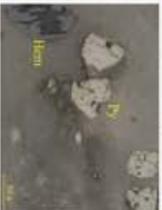
DATOS DE CAMPO	
Muestra: GH-4 (H-23)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.
Profundidad: 2496m	Coordenadas: Norte: 2175459 Este: 664184
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA	
Color:	Gris - verde
Textura:	Porfídica
Cristalinidad:	Hipocristalina
Forma del cristal	Sub cuhedral
MINERALOGÍA :	
Transparentes	Secundarios Transparentes
Esenciales	Accesorios
Plagioclasas 75 % (Albita)	Cuarzo 1 %
Vidrio volcánico 10 % Feldespato alcalino 10 % (Sanidina)	Epidota 8 % Sericita
Ortopiroxeno 2 %	Primarios opacos
	Ilmenita 1 % Magnetita 1.5 % Neoformados Hematita 2 % Pirita 0.5%
CLASIFICACIÓN	
Nombre de la roca:	Andesita
Alteración : Propilítica moderada (Ep)	Oxidación: Moderada (He + Mag + ilm)
REGISTRO FOTOGRÁFICO	
	
Fecha: 13/01/2015	Petrografía: Erik Hugo Diaz Carreño David Yáñez Dávila

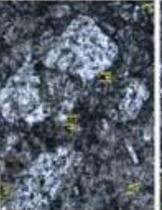
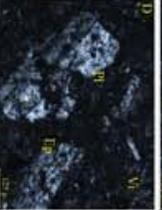
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-5 (H-25)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1710m	Coordenadas:	Norte: 2176169	Este: 666396
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris oscuro	Tamaño de cristal:	> 10 μ <50 μ
Textura:	Microlítica ofítica	Forma Cristalina	Alotriomorfo
Cristalinidad:	Holocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Anhedral	Estructuras:	Fracturas
MINERALOGÍA :			
Transparentes		Secundarios Transparentes	Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Ilmenita 2 %
Plagioclasas 80 % (Albita)	Biotita 2%	Epidota 3 %	Neoformados
Clinopiroxeno 10 % (Augita)			Pirita 5%
Ortopiroxeno 5 % (Enstatita)			
CLASIFICACION			
Nombre de la roca:	Andesita microlítica - Basalto		
Alteración : Propilítica moderada (Ep)	Oxidación: Débil (Ilm)		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
			
			
Fecha: 13/01/2015	Petrografo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila		

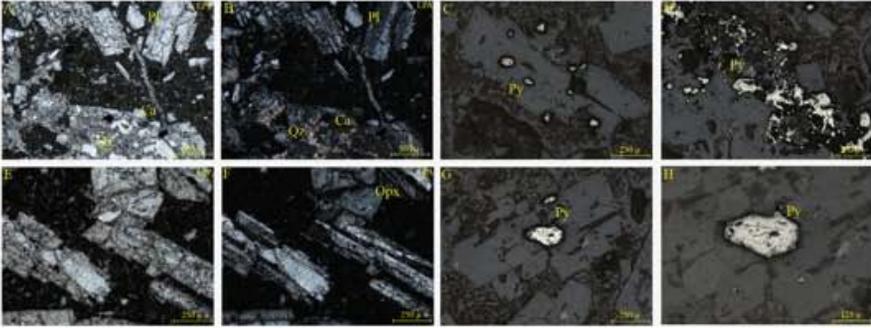
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-6 (H-25)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 2300m	Coordenadas:	Norte: 2176169	Este: 666396
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Incoloro - Amarillo	Tamaño de cristal:	> 10 μ <50 μ
Textura:	Microlítica ofítica	Forma Cristalina	Idiomorfo
Cristalinidad:	Holocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} , 2 ^{do} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Euhedral	Estructuras:	Fracturas y reemplazamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes		Secundarios Transparentes	Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Ilmenita 0.5% Magnetita 0.5%
Plagioclasas 80 % (Albita)	Biotita 1%	Epidota 5 %	Neoformados
Clinopiroxeno 8 % (Augita)		Calcita 2 %	Hematita 2 %
Ortopiroxeno 2% (Enstatita)		Sericita	Pirita 0.7 -1 %
CLASIFICACION			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilítica moderada (Ep)	Oxidación: Débil (He + Mag + Ilm)		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
			
			
Fecha: 13/01/2015	Petrografo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila		

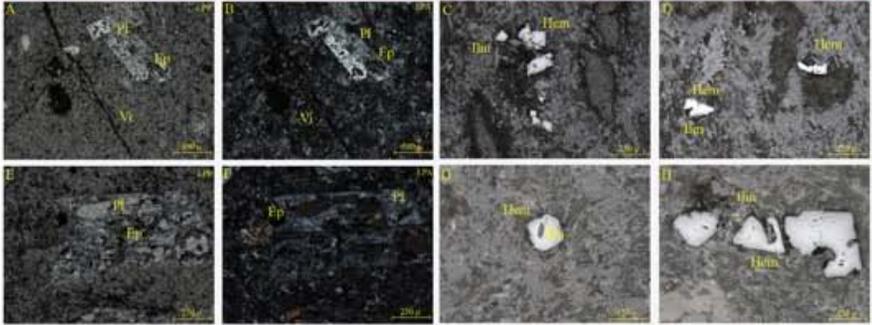
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-7 (H-38)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1103m	Coordenadas:	Norte: 2178155	Este: 661897
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris	Tamaño de cristal:	> 100 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidimorfo
Cristalinidad:	Holocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} orden
Forma del cristal	Sub- euhedral	Estructuras:	Fracturas
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	
Plagioclasas 80 % (Albita) (Oligoclasa) Vidrio volcánico 10%	Cuarzo 1 - 2 %	Calcita 5 % Clorita 3 %	Neoformados Pirita 3.5 - 4 % Hematita 1 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilitica moderada (Ep + Ca)	Oxidación: Débil (He)		
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
			
Fecha: 13/01/2015		Petrografo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila	

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-8 (H-38)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1500m	Coordenadas:	Norte: 661897	Este: 661897
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris - Negro	Tamaño de cristal:	> 10 μ <700 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Alotriomorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} , 2 ^{do} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Anhedral	Estructuras:	Reemplazamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	
Plagioclasas 75 % (Oligoclasa) Vidrio volcánico 10% Clinopiroxeno 5 % (Augita) Ortopiroxeno 3 % (Enstatita)	Cuarzo 1 %	Epidota 5 %	Neoformados Pirita 0.7 - 1.0 % Hematita 0.3 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilitica moderada (Ep)	Oxidación: No presenta		
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
			
Fecha: 13/01/2015		Petrografo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila	

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-9 (H38)	Campo Geotérmico Los Hornos, Puebla.		
Profundidad: 1953m	Coordenadas:	Norte: 2178155	Este: 661897
DESCRIPCION GENERAL MICROSCOPICA			
Color:	Incoloro - Gris	Tamaño de cristal:	> 10 μ <50 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Alotriomorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Anhedral	Estructuras:	Fracturas y clastos
MINERALOGIA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	
Fragmentos de roca 40%	Biotita 1%	Epidota 5%	Neofornados
Cuarzo 20%		Calcita 1%	Pirita 0.5 %
Ortopiroxeno 15 % (Enstatita)			Hematita 0.5 %
Vidrio volcánico 10 %			
Clinopiroxeno 5 % (Augita)			
CLASIFICACION			
Nombre de la roca:	Toba lítica		
Alteración : Propiética moderada (Ep)	Oxidación: No presenta		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
			
			
Fecha: 13/01/2015			
Petrografo: Erik Hugo Diaz Carrero David Yáñez Davila			

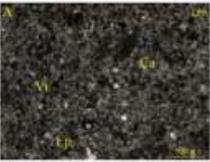
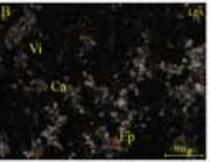
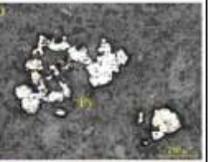
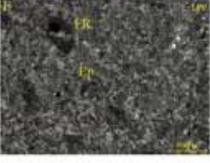
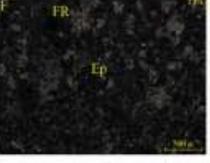
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-10 (H38)	Campo Geotérmico Los Hornos, Puebla.		
Profundidad: 1803m	Coordenadas:	Norte: 2178155	Este: 661897
DESCRIPCION GENERAL MICROSCOPICA			
Color:	Gris - Negro	Tamaño de cristal:	> 100 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidomorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} , 2 ^{da} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Sub-euhedral	Estructuras:	Reemplazamiento
MINERALOGIA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	
Plagioclasas 70 % (Albita)	Cuarzo 4 %	Calcita 5 %	Neofornados
Vidrio volcánico 15 %	Biotita 0.5 %	Epidota 3 %	Pirita 0.7 -1.0 %
Clinopiroxeno 2 % (Augita)			Hematita 0.3 %
CLASIFICACION			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propiética moderada (Ep + Ca)	Oxidación: Débil (Hem)		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
			
			
Fecha: 13/01/2015			
Petrografo: Erik Hugo Diaz Carrero David Yáñez Davila			

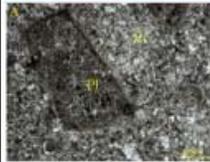
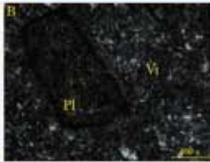
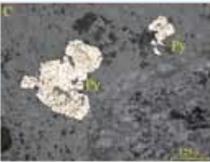
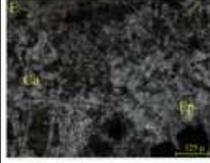
DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-11 (H39)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1200m	Coordenadas:	Norte: 2173291	Este: 663365
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris - verde	Tamaño de cristal:	> 50 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidimorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1ª y 3ª orden
Forma del cristal	Sub- euedral	Estructuras:	Vetillas y fracturamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Neoformados
Plagioclasas 70 % (Albita) Vidrio volcánico 10 % Ortopiroxeno 5 % (Enstatita) Clinopiroxeno 3 % (Augita)	Cuarzo 5 %	Calcita 8 % Epidota 3 %	Pirita 2.0 - 2.5 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilitica baja (Ep)	Oxidación: No presenta		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
			
Fecha: 13/01/2015	Petrógrafo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila		

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-12 (H39)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1650m	Coordenadas:	Norte: 2173291	Este: 663365
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris - verde	Tamaño de cristal:	> 50 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidimorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1ª y 3ª orden
Forma del cristal	Sub- euedral	Estructuras:	Reemplazamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Ilmenita 0.3 - 0.5%
Plagioclasas 75% (Albita) Vidrio volcánico 20 %	Cuarzo 5 %	Epidota 3 %	Neoformados Hematita 2 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilitica moderada (Ep)	Oxidación: Moderado (Hem + Ilm)		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
			
Fecha: 13/01/2015	Petrógrafo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila		

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-13 (H39)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1800m	Coordenadas:	Norte: 663365	Este: 2173291
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris - Negro	Tamaño de cristal:	> 100 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidimorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} y 2 ^{do} orden
Forma del cristal	Sub- euهدral	Estructuras:	Reemplazamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Ilmenita 0.5%
Plagioclasas 65 % (Albita) Anfibol 15 % (Hornblenda) Ortopiroxeno 10 % (Enstatita)	Cuarzo 2 %	Epidota 3 % Calcita 1 % Clorita 0.5 %	Neoformados Hematita 2 % Pirita 0.7 -1 %
CLASIFICACION			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilitica moderada (Epidota)	Oxidación: Moderada (Hem + Ilm)		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
Fecha: 13/01/2015	Petrografo: Erik Hugo Diaz Carreño David Yáñez Dávila		

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-14 (H39)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 2100m	Coordenadas:	Norte: 2173291	Este: 663365
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris - verde	Tamaño de cristal:	> 50 μ <1000 μ
Textura:	Porfídica	Forma Cristalina	Subidimorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} y 2 ^{do} orden
Forma del cristal	Sub- euهدral	Estructuras:	Reemplazamiento
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	Ilmenita 0.5% Magnetita 0.5%
Plagioclasas 75% (Albita) Vidrio volcánico 20 %	Cuarzo 2 %	Epidota 3 % Calcita 1 % Clorita 0.7 - 1.0 %	Neoformados Hematita 0.5 % Pirita 3.0 -3.5 %
CLASIFICACION			
Nombre de la roca:	Andesita		
Alteración : Propilitica moderada (Epidota)	Oxidación: Moderado (Hem + Ilm + Mag)		
REGISTRO FOTOGRAFICO			
Fecha: 13/01/2015	Petrografo: Erik Hugo Diaz Carreño David Yáñez Dávila		

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-15 (H40)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 1612m	Coordenadas:	Norte: 2175711	Este: 661754
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Incoloro - Gris	Tamaño de cristal:	> 10 μ <200 μ
Textura:	Afanítica	Forma Cristalina	Alotriomorfo
Cristalinidad:	Hipocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Anhedral	Estructuras:	No presenta
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	
Vidrio volcánico 70 % Plagioclasas 20% (Albita) Fragmentos de roca 5 %	Cuarzo 2 %	Epidota 3 % Calcita 1 % Clorita 0.7 - 1.0 %	Neoformados Pirita 1.5 -2 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Toba vítrea		
Alteración : Propilítica moderada (Epidota)	Oxidación: Débil		
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
			
			
Fecha: 13/01/2015		Petrógrafo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila	

DATOS DE CAMPO			
Muestra: GH-16 (H40)	Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.		
Profundidad: 2100m	Coordenadas:	Norte: 2175711	Este: 661754
DESCRIPCIÓN GENERAL MICROSCÓPICA			
Color:	Gris oscuro	Tamaño de cristal:	> 10 μ <500 μ
Textura:	Microlítica	Forma Cristalina	Subidimorfo
Cristalinidad:	Holocristalina	Birrefringencia	1 ^{er} y 3 ^{er} orden
Forma del cristal	Sub- euhedral	Estructuras:	Fracturas
MINERALOGÍA :			
Transparentes	Secundarios Transparentes		Primarios opacos
Esenciales	Accesorios	Secundarios Transparentes	
Plagioclasas 68% (Albita) Vidrio volcánico 30 %		Calcita 1 % Epidota 0.5 %	Neoformados Hematita 1% Pirita 0.2 %
CLASIFICACIÓN			
Nombre de la roca:	Basalto		
Alteración : Propilítica intensa (Ca + Ep)	Oxidación: Moderado (Hem)		
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
			
			
Fecha: 13/01/2015		Petrógrafo: Erik Hugo Díaz Carreño David Yáñez Dávila	

ANEXOS III

Tabla 22. Análisis por FRX-ED de las muestras regionales del CGH.

And_Ba_Aglu: andesita – basaltos y aglutinantes; An_Rio: Andesitas – Riolitas; Dep_Piro: depósitos piroclásticos. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Litología
	%					µg·g ⁻¹																			
L5-2	49.68	1.40	16.13	6.94	0.14	1.52	4.56	1.69	0.55	66.80	463.75	249.69	11.46	110.78	38.63	34.45	99.79	4.10	18.11	1184.68					And_Ba_Aglu
L5-3	49.75	1.49	15.31	6.80	0.11	1.57	4.19	1.53	0.38	103.51	443.41	244.38	11.99	100.25	26.48	24.54	82.73	5.11	14.56	1780.97		2.77	3.48		And_Ba_Aglu
L4-2	51.11	1.36	14.07	6.62	0.11	1.58	5.05	1.95	0.23	121.68	460.25	231.80	10.63	112.72	27.83	38.64	73.72	4.97	7.72	851.21	4.35	4.44			And_Ba_Aglu
L4-4	48.57	1.46	13.87	7.06	0.12	1.61	4.74	1.81	0.15	122.57	466.25	258.09	12.94	89.67	35.63	27.49	85.90	6.42	11.31	813.44		4.26	4.22		And_Ba_Aglu
L4-5	45.20	1.40	13.09	7.06	0.11	1.32	4.63	1.70	0.16	110.77	448.35	240.09	11.35	112.26	23.70	38.75	80.54	5.72	12.39	853.02		3.99	3.53		And_Ba_Aglu
L3-2	49.86	1.41	14.60	6.64	0.12	1.33	4.53	1.64	0.18	96.49	447.89	237.87	11.62	103.93	24.89	18.77	73.72	7.93	33.53	937.06			5.28		And_Ba_Aglu
L3-4	46.48	1.36	12.38	6.94	0.12	1.61	4.42	1.78	0.27	110.72	432.05	228.80	9.30	116.06	38.01	25.03	79.84	5.56	12.88	1033.15					And_Ba_Aglu
L2-4	48.32	1.49	13.58	6.95	0.12	2.21	4.56	1.76	0.20	116.19	463.54	241.53	9.89	127.64	24.73	25.84	73.53	5.66	12.45	911.23		4.47			And_Ba_Aglu
L1-3	49.60	1.53	14.60	7.36	0.12		4.39	1.63	0.37	106.55	423.42	249.83	12.54	122.75	30.85	32.56	83.48	5.02	12.67	1109.19		5.03	3.65		And_Ba_Aglu
And_Ba_Aglu	63.73	0.96	16.24	5.19	0.04	2.50	4.05	2.75	0.29	74.48	375.45	252.54	13.60	98.18	11.59	14.05	58.42	7.46	11.35	487.45	0.01	5.56	8.42	0.01	And_Ba_Aglu
L1-8	45.88	1.24	13.47	6.43	0.10	1.42	5.48	1.43	0.15	83.39	461.53	186.28	7.00	93.79	33.28	2.57	73.30	0.11	5.02	479.61		3.06			And_Rio.
L1-11	50.29	1.54	13.97	7.53	0.14	1.40	3.99	1.45	0.37	113.36	434.64	255.75	13.71	121.50	21.33	39.03	98.84	5.50	12.59	612.29		5.48			And_Rio.
L2-10	60.26	1.40	17.07	6.54	0.11	1.22	4.23	2.28	0.24	132.09	404.09	267.55	14.33	103.18	34.09	31.30	75.84	5.55	13.64	351.75		3.31			And_Rio.
L2-11	50.71	1.51	13.34	7.53	0.13		4.32	1.86	0.14	123.54	455.12	267.50	13.89	97.76	16.66	52.88	87.52	5.82	11.64	846.89	4.87	6.97	4.38		And_Rio.
L3-11	46.63	1.52	13.68	7.31	0.14	1.46	4.51	1.82	0.67	123.87	417.48	275.72	16.36	138.14	24.79	33.08	92.64	6.76	13.91	1119.53	4.25	4.13	5.39		And_Rio.
L3-10	51.28	1.74	14.71	7.22	0.13	2.38	4.58	1.95	0.17	125.94	430.65	280.30	15.81	112.29	27.07	36.69	92.28	6.07	12.48	898.26		6.42	5.23		And_Rio.
L1-10	57.60	1.54	16.12	7.04	0.12		4.56	2.11	0.21	120.85	448.19	266.86	15.04	124.45	35.95	39.84	87.84	6.03	12.61	822.83		3.69			And_Rio.
L5-11	52.84	1.57	14.62	7.31	0.13	2.27	4.71	2.07	0.23	129.48	436.71	285.41	15.23	126.60	17.34	41.64	92.56	7.23	10.91	829.30	5.61	6.05	5.80		And_Rio.
And_Rio.	60.87	1.35	17.82	7.15	0.07	2.66	4.98	2.25	0.34	52.03	446.23	225.15	13.97	146.99		39.04	77.15	3.39	11.88	0.01	4.39	5.04	0.01	0.01	And_Rio.
L1-6	61.21	0.59	11.02	3.08	0.07		1.74	4.29	0.06	106.79	174.33	338.38	15.69	9.68	7.00	2.57	44.57	12.63	19.68	997.83		5.32	12.23	7.88	Dep_Piro.
L2-7	53.95	0.73	11.16	3.77	0.08		1.99	3.04	0.09	176.04	201.55	329.18	15.02	9.92	4.44	2.57	61.57	9.82	11.80	368.88	3.81	2.48	7.47	8.34	Dep_Piro.
L4-6	51.56	0.85	13.95	4.22	0.10		2.08	2.45	0.15	175.26	270.69	386.58	19.37	25.79	16.69	2.57	68.49	12.75	17.47	898.77		3.86	10.66	6.90	Dep_Piro.
L4-8	53.14	0.71	10.77	3.65	0.08		1.91	2.99	0.06	182.92	192.54	343.32	17.87	9.78	1.33	2.57	59.83	10.08	13.37	960.27	3.79	3.80	8.03	7.34	Dep_Piro.
L4-10	41.74	1.42	10.95	7.10	0.12		3.90	1.80	0.14	117.06	410.49	277.68	15.89	101.59		27.87	78.09	5.83	10.38	778.92		5.09	3.49		Dep_Piro.
L5-5	54.41	0.78	12.40	3.99	0.09		2.17	2.86	0.11	174.08	256.99	367.45	19.90	12.55	14.40	2.57	67.32	12.15	16.09	866.37		5.28	10.15	10.21	Dep_Piro.
L5-6	50.01	0.87	14.43	4.58	0.09		1.87	2.68	0.12	156.95	221.85	386.03	18.87	33.05	7.24	2.57	73.73	14.28	18.11	1490.66	4.06	2.43	13.44	6.34	Dep_Piro.
L5-9	50.13	0.70	10.31	3.59	0.08		1.92	2.98	0.10	188.97	202.61	318.43	15.63	17.61		2.57	50.07	12.75	14.87	1838.49	3.34	2.64	11.05	11.58	Dep_Piro.
L5-10	55.74	1.20	13.68	5.74	0.10		3.31	2.48	0.18	139.68	327.81	291.85	14.70	62.26	30.03	2.57	74.38	7.41	9.05	2300.68	3.13		4.75	5.89	Dep_Piro.
L6-5	39.82	0.65	7.06	3.37	0.08		1.70	2.52	0.05	148.89	171.36	287.64	12.26	7.97		2.57	52.07	6.92	12.22	278.26		3.79	4.94	5.02	Dep_Piro.
L6-9	28.91	1.04	6.22	5.52	0.10		2.89	1.60	0.04	109.80	292.06	253.69	10.18	61.52		2.57	59.83	3.33	8.94	221.50					Dep_Piro.
L7-4	49.93	0.79	13.18	4.43	0.09		2.06	2.70	0.17	170.45	227.76	360.42	17.87	18.20	16.87	2.57	59.05	11.51	16.17	1190.52	2.93	5.89	9.03	7.06	Dep_Piro.
L7-6	40.32	0.90	8.92	4.63	0.09	1.34	2.13	2.19	0.06	142.23	219.85	304.66	14.43	37.79		2.57	47.63	7.65	9.58	1070.32	3.06	3.33	5.52	4.55	Dep_Piro.
L7-11	46.48	1.12	16.76	5.63	0.09		2.23	2.17	0.20	141.82	238.85	408.31	20.42	42.92	31.93	2.57	60.81	13.03	13.19	1172.18	4.14	3.01	12.09	5.96	Dep_Piro.
L9-10	43.34	1.18	15.91	5.91	0.09		2.19	2.04	0.14	126.04	240.26	393.83	18.01	66.43	39.48	2.57	56.13	10.97	15.92	668.19	4.61	5.26	9.74		Dep_Piro.
L2-8	60.30	0.75	13.36	3.89	0.08		2.14	3.25	0.09	174.22	206.75	313.88	14.93	10.16	11.81	2.57	57.41	9.80	13.84	1015.12		3.88	7.42	6.44	Dep_Piro.
L6-8	59.95	0.73	7.09	2.40	0.06		1.16	1.72	0.10	174.39	80.49	350.98	15.50	0.36		2.57	23.74	12.81	11.43	609.48	2.69	5.69	11.54	7.33	Dep_Piro.
L6-10	36.84	0.92	10.25	2.22	0.05		0.70	2.73	0.10	72.43	380.40	296.03	13.25	13.29		2.57	0.12	12.58	12.94	61083.16			12.09		Dep_Piro.
L7-10	37.58	1.70	13.10	2.79	0.05	0.70	0.74	1.52	0.09	42.91	246.87	332.60	14.10	73.37		2.57	9.72	9.78	6.86	30635.56	3.10		8.40	4.71	Dep_Piro.
willx-01	65.01	0.67	15.47	3.89	0.08	0.76	2.23	3.15	0.17	91.00	225.00	406.00	18.00	25.00	5.00	0.01	56.00	11.50	15.00	0.01	2.60	4.50	0.01	3.50	Dep_Piro.

Tabla 23. Análisis por FRX-ED de las muestras Locales del CGH.

Ba_Olvi: basalto de olivino; And: andesita; Esc_Volc: escoria volcánica; Lapi: Lapilli; Pumic: Pumicita. El Hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%																									
																	μg.g ⁻¹									
LL16-23	54.15	1.52	14.04	7.18	0.11	1.40	4.53	1.62	0.20	84.71	424.86	618.94	242.46	11.63	110.49	49.70	33.01	78.84	4.51	7.37	11019.28		4.96			Ba_Olvi
LL16-26	45.40	1.48	19.48	10.79	0.15	2.90	7.95	0.53	0.20	21.80	352.64	254.30	164.74	4.09	164.67	260.01	98.61	94.34	0.11	2.09	2280.85					Ba_Olvi
LL16-27	51.67	1.69	14.51	8.28	0.12	2.23	6.54	0.61	0.19	31.10	375.08	1159.78	205.25	6.30	152.98	228.55	45.23	66.22	0.11	5.55	4271.16	4.11				Ba_Olvi
LL17-25	45.79	1.42	15.96	9.46	0.15	6.44	7.86	0.54	0.27	32.28	358.14	262.93	169.66	5.64	174.04	324.84	70.51	103.51	0.11	5.84	861.30		3.25			Ba_Olvi
LL17-27	50.53	1.85	12.65	9.66	0.13		6.40	0.52	0.19	21.25	326.49		193.54	3.77	176.00	293.88	50.85	59.30	0.11	2.36	3019.01	4.00				Ba_Olvi
LL17-29	46.02	1.52	18.15	10.32	0.15	4.68	8.32	0.45	0.38	20.08	355.61		168.81	2.06	165.50	269.82	54.76	79.17	0.11		761.74	5.18	2.74			Ba_Olvi
LL17-30	46.10	1.49	16.47	9.88	0.16	5.51	7.42	0.54	0.51	28.70	327.94		170.37	3.31	176.73	293.73	41.67	90.90	0.11	4.82	817.77	5.65				Ba_Olvi
LL17-31	45.14	1.39	17.32	9.71	0.15	4.36	8.34	0.43	0.13	22.31	359.63	221.57	164.05	2.06	174.91	311.21	51.70	85.95	0.11	6.48	713.45		2.55			Ba_Olvi
LL17-32	52.45	1.77	13.74	8.24	0.14	3.01	5.32	0.82	0.37	45.67	304.33		180.78	2.60	147.08	274.70	22.16	65.14	0.11	4.17	3600.80	4.45				Ba_Olvi
LL18-24	48.97	1.64	14.81	10.25	0.13	2.83	5.81	0.86	0.34	37.18	335.63		177.55	2.72	157.27	259.00	35.99	77.37	0.11	2.00	6730.29	5.57				Ba_Olvi
LL18-25	46.99	1.52	16.19	9.51	0.14	4.59	7.91	0.49	0.24	24.11	354.98	274.28	171.61	3.32	175.02	330.11	48.09	78.36	0.11	3.78	1197.08					Ba_Olvi
LL18-27	44.55	1.51	14.76	10.88	0.13	2.61	7.13	0.34	0.11	13.55	320.33	271.37	170.94	1.23	159.64	306.73	52.27	73.28	0.11	2.05	816.14					Ba_Olvi
LL18-28	49.27	1.24	13.78	8.17	0.14	4.17	6.27	0.77	0.23	54.76	317.41		164.48	1.77	133.04	240.80	43.25	80.80	0.11	3.99	1104.25	3.88				Ba_Olvi
LL18-30	43.86	1.46	18.67	10.25	0.16	6.20	8.93	0.37	0.09	15.88	376.88	223.99	165.04	3.02	165.64	341.64	36.08	77.47	0.11	4.91	467.78		3.21			Ba_Olvi
LL18-31	42.13	1.46	13.90	9.35	0.14	3.53	7.38	0.73	0.22	34.36	358.18		167.37	3.04	151.56	348.57	54.06	93.75	0.11	5.42	1205.80	5.70				Ba_Olvi
LL18-32	43.40	1.45	17.78	10.09	0.16	6.40	8.01	0.49	0.37	22.13	350.60		166.79	2.92	165.56	297.66	59.16	90.70	0.11	2.67	1110.73	5.59				Ba_Olvi
LL18-33	48.15	1.51	16.75	9.67	0.15	5.90	8.08	0.44	0.19	20.55	347.75		170.85	3.99	170.29	336.92	45.07	78.80	0.11	4.10	999.63		2.73			Ba_Olvi
LL18-34	41.64	1.55	16.90	10.55	0.16	5.09	7.42	0.40	0.14	22.81	331.76		163.54	2.14	170.55	314.30	43.77	82.08	0.11	2.02	1728.11	5.14				Ba_Olvi
LL19-11	56.57	0.91	13.45	4.63	0.11		2.96	3.04	0.19	158.34	272.50	811.70	366.18	18.49	34.95	17.89		62.05	13.06	16.88	235.64		7.03	13.09		Ba_Olvi
LL19-19	43.63	1.44	17.53	10.36	0.17	7.08	8.78	0.37	0.11	16.07	372.10	286.21	166.74	3.63	156.01	325.76	57.94	88.21	0.11	2.08	618.63	4.82				Ba_Olvi
LL19-24	43.30	1.59	18.94	11.57	0.14	5.65	7.46	0.57	0.20	24.93	360.42	246.21	175.41	3.67	178.66	294.24	56.31	74.02	0.11	3.17	1451.52		2.77			Ba_Olvi
LL19-25	43.79	1.55	16.79	10.70	0.16	3.43	7.55	0.40	0.25	22.17	351.72		164.71	2.68	174.48	349.52	48.77	74.68	0.11		1061.85	4.91				Ba_Olvi
LL19-26	43.00	1.54	17.01	10.96	0.19	4.70	7.26	0.51	0.24	29.62	322.89	220.77	164.01	3.18	154.50	272.06	92.10	94.94	0.11	1.44		5.07	3.20			Ba_Olvi
LL19-27	44.24	1.43	15.62	9.54	0.16	2.80	7.83	0.50	0.09	19.37	357.41	165.76	168.37	4.63	137.36	290.19	57.88	79.46	0.11	4.49	778.05		3.28			Ba_Olvi
LL19-28	53.31	1.61	12.56	8.72	0.11	3.93	6.20	0.54	0.29	18.17	330.33		165.34	1.23	127.40	266.61	36.26	64.09	0.11	2.28	4466.15	3.64				Ba_Olvi
LL19-29	46.44	1.53	19.14	10.08	0.16	5.01	8.71	0.41	0.11	11.41	368.04	203.13	167.96	5.13	160.83	325.83	46.35	81.45	0.11	1.25		4.60	3.27			Ba_Olvi
LL19-30	43.92	1.47	16.59	9.33	0.17	5.29	7.43	0.56	0.32	30.16	341.36		172.17	3.44	139.34	278.02	45.23	90.85	0.11	5.67	732.33	4.37	3.32			Ba_Olvi
LL19-31	44.23	1.36	16.19	9.43	0.15	3.87	8.11	0.50	0.20	28.02	353.28		159.12	0.78	168.22	300.89	66.01	87.23	0.11	2.13	500.45	4.01				Ba_Olvi
LL19-32	44.06	1.36	16.52	9.98	0.16	4.90	8.56	0.36		14.80	371.68	259.06	162.22	3.98	155.65	304.10	56.38	85.89	0.11	4.16	467.66		3.72			Ba_Olvi
LL19-33	46.23	1.48	17.95	10.07	0.15	5.39	8.39	0.39	0.16	14.42	357.39	339.95	179.35	4.86	164.48	236.52	41.70	85.62	0.11	3.41	1021.88		3.13			Ba_Olvi
LL19-34	49.33	1.64	16.05	11.16	0.13	2.98	7.03	0.39	0.17	18.14	321.28		165.19	1.26	189.35	323.14	60.45	70.78	0.11		3271.09	6.85				Ba_Olvi
LL20-9	58.77	1.05	16.12	5.42	0.11	1.76	4.15	2.71	0.19	133.95	358.39		292.93	14.11	50.23	18.60		58.76	8.62	10.24	116.35	3.88	4.97	7.59		Ba_Olvi
LL20-16	42.05	1.38	15.59	9.92	0.16	4.96	8.37	0.42	0.14	20.15	369.56	269.11	168.92	2.19	161.72	321.88	57.31	89.46	0.11	2.76	704.46	4.62	3.83			Ba_Olvi
LL20-18	44.54	1.39	19.16	10.16	0.16	5.62	9.07	0.32	0.08	8.01	383.62	175.00	137.15	2.80	170.44	321.66	61.52	81.41	0.11	1.14	371.59	5.31	3.32			Ba_Olvi
LL20-19	43.05	1.44	15.29	10.07	0.16	3.00	8.08	0.55	0.10	23.47	363.18	203.08	172.24	3.05	154.84	333.60	52.07	88.81	0.11	2.15	880.72	6.02	4.20			Ba_Olvi
LL20-20	44.13	1.29	13.66	8.96	0.15	3.25	7.10	0.76	0.18	45.22	345.61	304.90	164.05	2.25	140.41	298.42	43.38	86.83	0.11	4.33	767.98		3.04			Ba_Olvi
LL20-21	47.92	1.37	18.94	9.65	0.16	7.98	8.22	0.58	0.13	28.32	362.80	237.64	165.71	2.80	155.48	371.00	65.04	99.22	0.11	5.13	630.17	4.57	2.64			Ba_Olvi
LL20-22	42.16	1.46	17.33	10.40	0.17	5.80	8.64	0.39	0.10	17.56	374.15	358.37	168.92	3.66	185.09	349.64	66.34	87.12	0.11	2.65	885.87	5.47	3.16			Ba_Olvi

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca		
	%																								µg·g ⁻¹			
LI20-23	42.32	1.38	17.85	10.21	0.17	5.75	8.75	0.33	0.20	12.77	362.22	257.88	163.24	3.28	179.29	342.13	41.94	92.58	0.11	1.43	475.99	5.00					Ba_Oht	
LI20-24	41.55	1.35	16.07	9.77	0.15	3.29	7.67	0.44	0.05	20.55	347.04	166.07	2.54	146.79	300.99	55.82	91.04	0.11	5.84	607.24	5.84		5.41				Ba_Oht	
LI20-25	44.95	1.56	13.82	9.09	0.14	4.39	6.44	0.63	0.23	32.07	302.76	191.88	4.87	155.26	252.32	49.73	80.55	0.11	5.00	1353.14	5.00						Ba_Oht	
LI20-27	40.05	1.72	17.34	11.65	0.15	2.55	7.35	0.35	0.24	11.55	338.61	223.76	183.78	5.15	220.38	356.54	61.31	81.23	0.11	4.04	4053.19	4.70					Ba_Oht	
LI20-28	42.92	1.47	17.15	10.22	0.16	5.73	8.96	0.43	0.03	12.96	393.44	490.10	167.67	4.84	175.54	298.27	82.02	91.01	0.11	2.60	6948.36	3.92	4.07				Ba_Oht	
LI20-29	48.37	1.62	16.47	9.52	0.13	2.52	8.03	0.47	0.14	12.51	412.55	471.22	179.54	2.75	199.71	328.99	44.72	64.60	0.11	4.01	5084.59						Ba_Oht	
LI20-32	46.10	1.39	16.46	9.68	0.15	6.39	8.03	0.46	0.03	21.58	361.50	283.12	169.73	2.30	162.39	308.12	76.12	85.76	0.11	6.88	1304.18	2.96					Ba_Oht	
LI20-33	43.96	1.40	18.09	10.36	0.15	5.34	8.87	0.29	0.14	7.64	365.54	183.97	158.98	2.84	168.41	317.28	59.89	81.49	0.11	0.81	377.34						Ba_Oht	
LI20-34	42.84	1.43	16.45	10.15	0.16	3.92	8.23	0.46	0.20	20.67	358.79	217.32	165.10	2.32	167.52	327.34	60.22	91.40	0.11	3.74	754.97	5.88	3.69				Ba_Oht	
LI20-35	41.30	1.56	16.00	10.89	0.18	3.77	8.24	0.42	0.36	18.14	371.93	718.84	180.43	5.05	183.21	321.87	49.57	86.82	0.11	6.53	527.03	4.82	3.97				Ba_Oht	
Ba_Oht	48.15	1.35	21.10	10.07	0.11	8.52	9.60	0.49	0.27	5.17	373.48	422.17	126.97	3.65	188.46	194.34	64.22	76.06	0.11	5.85	407.10	4.73	3.62				Ba_Oht	
LI2-22	47.54	1.49	13.74	7.78	0.13	1.72	6.42	1.55	0.13	86.83	460.23	683.61	238.72	11.63	143.90	85.92	30.48	96.10	0.11	9.39	114.96	11.17	4.93				Esc_Volic	
LI3-28	59.95	0.69	12.00	3.23	0.08		1.47	3.78	0.06	230.96	134.28	389.93	19.18	9.81							18.84	14.74	4.57	8.66	19.79		Esc_Volic	
LI4-23	52.36	1.41	13.22	6.62	0.10	3.00	4.86	1.95	0.16	120.64	439.52	801.94	233.62	11.12	92.09	21.29	18.51	66.04	4.48	7.93			5.86				Esc_Volic	
LI4-28	51.14	1.44	15.89	7.57	0.13	1.05	6.44	1.50	0.15	85.70	461.89	733.72	244.54	12.38	148.49	86.30	17.54	84.97	3.17	7.71	220.23	11.66	4.54				Esc_Volic	
LI5-29	51.53	1.45	15.96	7.68	0.13	3.19	6.28	1.57	0.16	86.38	446.90	610.03	240.22	11.23	129.46	71.37	22.17	103.82	3.27	12.62	912.53	9.68	6.13				Esc_Volic	
LI6-17	47.64	1.59	15.08	7.04	0.12	0.89	3.63	1.49	0.15	90.43	336.72	281.88	14.73	95.41	43.41	24.36	81.81	5.04	10.45	367.99			3.59				Esc_Volic	
LI6-33	53.40	1.40	14.06	6.63	0.11		4.60	1.95	0.18	116.57	426.26	648.84	230.14	10.21	106.38	31.44	37.59	78.25	4.78	12.53		5.46	3.08				Esc_Volic	
LI6-35	52.03	1.42	13.35	6.81	0.11		4.85	1.96	0.16	123.30	444.62	931.20	238.99	11.33	119.55	29.08	21.84	78.05	4.62	10.12	104.09	6.78	5.30				Esc_Volic	
LI7-25	49.36	1.26	16.75	6.75	0.11	2.04	6.76	1.45	0.12	78.23	478.55	209.36	9.16	106.85	54.49	35.65	63.22	0.11	5.78	0.00			2.91				Esc_Volic	
LI8-19	49.21	1.44	14.86	7.65	0.13	1.25	6.55	1.59	0.16	85.65	464.35	605.24	239.15	11.68	138.71	78.20	48.64	89.13	0.11	5.99	294.66		3.50				Esc_Volic	
LI8-26	54.67	1.44	14.73	6.73	0.10	1.04	4.69	2.00	0.17	122.69	436.46	561.90	226.06	9.56	94.59	27.43	30.79	75.29	4.64	10.11			5.01				Esc_Volic	
LI8-27	54.29	1.42	14.39	6.76	0.11	1.23	4.53	1.94	0.16	118.45	433.07	554.07	228.81	10.64	103.40	9.49	27.80	70.50	4.28	10.04			4.04	3.88			Esc_Volic	
LI8-28	46.41	1.38	11.41	6.83	0.11		4.27	1.93	0.05	121.89	444.54	656.02	226.95	10.02	105.95	29.63	38.70	73.91	5.47	6.91	275.74	6.10	4.30				Esc_Volic	
LI10-19	45.85	1.33	13.35	7.84	0.13		6.09	1.48	0.16	86.33	455.22	1097.46	245.46	12.59	109.18	62.25	30.74	78.41	4.96	7.75	2644.22	3.90	3.72	3.57				Esc_Volic
LI12-35	40.41	1.23	9.92	6.57	0.10	1.53	4.06	1.68	0.01	113.38	423.63	536.12	217.71	9.36	74.89						287.73	2.79	5.12	3.57				Esc_Volic
LI14-30	50.72	1.24	11.43	6.15	0.10	2.40	4.19	1.80	0.17	108.44	398.74	226.90	226.90	9.96	86.28	19.09	19.31	72.15	3.19	8.21	520.26	2.56						Esc_Volic
LI15-30	48.47	1.47	13.32	7.64	0.13	1.22	6.43	1.55	0.16	82.97	456.10	674.21	241.25	12.15	119.20	62.81	34.89	78.85	0.11	8.92	132.33		3.99					Esc_Volic
LI9-5	47.96	1.30	12.21	6.58	0.10		4.62	1.90	0.16	117.23	432.71	610.60	225.43	9.14	105.21	0.58					253.41							Esc_Volic
LI9-19	47.82	1.44	13.92	7.72	0.13	1.11	6.57	1.45	0.15	83.77	459.48	586.77	237.83	11.33	133.17	75.45					5.89		2.65					Esc_Volic
LI3-15	52.46	0.92	11.81	5.57	0.10		4.49	2.11	0.43	149.32	392.68	887.78	252.93	11.28	52.96	61.64	33.25	64.38	7.88	13.64	502.56	4.35	5.25	5.05				Lapt
LI4-16	49.31	1.00	18.15	2.42	0.05		1.12	1.88	0.12	118.97	222.97	205.96	5.77	68.03	135.10						49843.71	2.70	2.55	6.38	4.50			Lapt
LI4-21	54.72	1.10	15.21	5.30	0.10		4.10	2.49	0.11	144.30	375.99	284.21	11.55	48.78	63.43	17.56	75.29	8.57	11.54	541.21	2.88	4.21	7.47					Lapt
LI6-14	50.96	1.08	13.22	5.21	0.10		2.86	2.31	0.13	142.04	308.60	668.52	337.53	16.57	72.72	31.20					312.85	2.57	7.99	4.76				Lapt
LI7-22	49.63	1.38	11.69	6.65	0.11		4.41	2.06	0.13	124.22	423.67	612.60	224.31	9.35	105.52	49.69	40.16	76.60	4.54	10.66		5.30						Lapt
LI7-27	42.99	1.13	13.70	6.84	0.11	1.63	6.59	1.30		74.13	527.60	613.40	214.81	9.16	100.10	39.52	41.00	77.46	0.11	6.80	293.93	4.93						Lapt
LI8-3	48.85	1.43	15.05	7.48	0.13	2.36	5.81	1.63	0.26	84.50	457.15	787.39	238.54	12.10	110.99	60.25	39.63	78.69	4.16	13.58	7889.05	7.21	3.96					Lapt
LI8-15	41.95	1.64	12.93	7.61	0.11	1.98	4.39	1.30	0.07	79.95	437.78	831.84	249.90	11.47	97.88	45.57	45.40	78.49	4.92	10.04								Lapt
LI8-21	49.78	1.34	14.58	6.89	0.11	1.12	6.13	1.51	0.16	88.20	490.47	607.43	221.76	10.42	101.94	31.03	31.52	80.98	4.95	9.37	403.34	3.81	3.53					Lapt

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%																								μg.g ⁻¹	
LL9-12	55.65	1.15	13.52	5.70	0.10		2.82	2.86	0.11	176.01	234.82		346.59	16.84	69.44	30.24		60.91	11.75	12.06			4.74	10.43	6.71	Lapi.
LL9-17	41.94	1.77	14.29	7.26	0.11	0.65	3.22	0.83	0.09	68.62	351.41		275.45	12.46	60.41	57.09	21.96	85.42	3.33	7.29						Lapi.
LL9-30	42.61	1.29	12.90	5.86	0.10	0.76	2.64	1.57	0.07	105.30	325.64		306.05	14.32	60.12	42.98	16.78	68.95	6.34	14.32	85.19		3.58	4.04		Lapi.
LL10-11	55.99	0.84	11.50	4.21	0.09		2.27	3.19	0.05	185.96	238.51		348.62	17.95	25.45	21.22		64.52	10.93	13.86			8.35	10.85		Lapi.
LL11-32	51.15	1.61	15.86	7.05	0.12		3.14	1.70	0.17	103.04	301.38	714.41	318.77	15.47	76.66	60.56		73.86	8.23	11.67	407.22	5.42		6.74	4.93	Lapi.
LL12-10	55.58	1.38	13.85	6.30	0.10		3.98	2.34	0.18	133.48	379.75	580.75	284.92	15.57	78.43	31.81		78.30	5.24	11.05	440.96			4.47		Lapi.
LL13-13	47.42	1.11	9.24	1.01	0.05		0.78	1.90	0.10	71.42	367.49		188.48	6.31	31.56				5.63	7.39	50321.38		5.13	4.79		Lapi.
LL13-15	61.30	0.87	10.26	3.25	0.07		1.15	1.50	0.03	81.76	232.23	1359.55	266.96	13.49	17.37	26.80		183.89	7.49	8.53	10251.71	6.75	5.31	6.40		Lapi.
LL14-19	49.13	0.78	15.20	4.02	0.05		0.92	2.10	0.06	82.92	212.13		235.64	9.62	28.41			12.79	6.88	9.28	53151.19		4.22	5.56		Lapi.
LL_Lap	55.17	1.77	14.77	7.70	0.12	1.99	4.56	2.09	0.26	123.99	428.63	877.22	283.41	15.92	105.78	26.34	34.41	79.09	7.74	11.21	130.54	5.02	7.67	7.53		Lapi.
LL1-1	52.61	0.78	11.92	3.78	0.08	0.78	1.89	2.84		155.96	174.07		338.64	13.92	4.71	0.73		52.53	12.03	11.99	203.40	3.66	7.08	13.05		Pumic.
LL1-6	58.14	0.86	15.37	4.49	0.09	1.33	2.15	2.69	0.09	166.38	226.41		357.33	17.28	13.02	28.52		59.99	11.67	14.51		3.66	5.82	10.65		Pumic.
LL1-7	57.39	0.82	14.70	4.08	0.08		2.01	3.20	0.11	168.00	195.78		379.23	18.12	19.69	29.91		58.70	12.60	14.45			2.75	10.77	7.19	Pumic.
LL1-11	55.22	0.81	13.28	4.09	0.09		1.97	3.00	0.01	175.28	206.86		407.10	18.38	3.69	37.91		57.06	13.46	16.12	233.51	3.64	10.25	12.85		Pumic.
LL1-14	56.84	0.89	15.98	4.31	0.09		2.02	2.69	0.09	165.48	220.92		379.31	19.16	14.70	22.61		64.05	14.79	13.43		3.41		13.35	7.42	Pumic.
LL1-15	59.40	0.62	10.56	2.99	0.07		1.38	3.94	0.04	221.80	114.37		332.41	15.42	4.25	15.17		36.15	12.68	15.06			8.27	12.14	4.54	Pumic.
LL1-16	56.82	0.84	13.72	4.24	0.09		2.07	3.03	0.13	180.14	271.46		370.93	19.88	28.76	22.20		68.88	12.38	15.15	410.11	3.43	3.84	11.64	6.60	Pumic.
LL1-17	52.77	0.86	13.81	4.46	0.09		2.12	2.63	0.13	147.57	194.85		308.14	13.46	36.18	34.85		50.23	11.27	11.70	237.88	3.01	5.01	10.38	6.17	Pumic.
LL1-18	57.45	1.00	16.15	4.85	0.10		2.30	2.15	0.34	141.38	236.90		334.69	16.12	42.41	36.25		60.16	11.12	14.22	524.90	3.12	2.54	9.17	8.11	Pumic.
LL1-21	58.36	0.71	11.67	3.35	0.07		1.73	3.46	0.15	211.24	137.48		356.11	16.72	9.92	26.28		48.59	15.01	16.20	469.21	3.11	5.29	13.86	7.41	Pumic.
LL1-22	55.59	0.79	12.52	3.96	0.08		2.03	2.83	0.14	170.22	189.28		322.91	14.57	20.38	24.19		62.18	9.43	14.63	302.52		3.20	8.13	6.10	Pumic.
LL2-2	58.26	0.76	13.92	3.94	0.08		1.93	3.15	0.07	181.88	191.62		361.48	16.17	17.95	27.44		56.51	12.53	15.25			6.20	11.95	6.66	Pumic.
LL2-7	49.99	0.87	13.99	4.53	0.09		1.96	2.59	0.14	148.82	186.48		429.09	21.86	32.33	28.10		67.65	13.37	20.08	324.91		3.34	12.89	7.76	Pumic.
LL2-10	57.98	0.79	13.98	4.05	0.08	0.80	2.02	3.24	0.08	177.24	192.23		360.72	17.39	6.08	21.49		65.90	11.39	14.23		3.99	6.48	10.31	4.52	Pumic.
LL2-12	57.06	0.80	14.69	4.14	0.09		2.08	2.95	0.10	178.09	272.13		391.93	19.56	11.38	21.70		66.56	14.05	16.76		3.00	6.24	13.76	4.86	Pumic.
LL2-13	56.93	0.81	14.68	4.11	0.09		1.95	2.67	0.07	164.54	206.63		377.51	19.15	12.35	17.20		64.75	13.83	16.82	242.12		3.55	12.99	6.74	Pumic.
LL2-15	55.19	0.99	13.09	4.77	0.09	1.13	4.01	2.81	0.12	160.23	360.55		272.84	11.22	45.22	43.17		52.24	7.66	7.48	107.60	2.93	4.76	6.75		Pumic.
LL2-18	51.27	0.85	11.20	4.53	0.09		2.40	2.84	0.08	169.68	243.26		329.03	15.26	17.70	23.43		62.63	9.15	13.43	183.72	3.08	7.21	7.77		Pumic.
LL2-30	60.97	0.92	14.51	4.52	0.09		2.40	2.92	0.14	178.02	226.11		315.30	14.56	27.74	24.32		52.17	11.05	15.15	244.87	5.58	6.92	10.91		Pumic.
LL2-32	57.62	0.72	12.47	3.82	0.08		1.89	3.29	0.02	200.14	191.94		384.01	20.58	8.50			60.04	14.08	15.32			4.91	13.75	5.01	Pumic.
LL3-1	56.00	0.80	13.85	4.00	0.09	0.99	2.03	2.84	0.13	159.73	201.49		374.88	17.88	5.50	20.64		62.83	10.97	17.10			2.84	9.16	7.15	Pumic.
LL3-3	57.05	0.81	14.53	4.18	0.08		2.02	2.82	0.06	168.21	216.91		350.29	16.60	6.28	12.77		66.38	10.85	17.79	106.53		7.47	10.80		Pumic.
LL3-8	54.67	0.78	12.37	3.92	0.08		1.98	3.03	0.07	161.74	187.41		346.90	16.52	19.12	21.06		58.46	11.54	15.01	248.44		4.78	10.53	7.55	Pumic.
LL3-9	54.02	0.81	14.10	4.16	0.08	1.04	1.94	2.82	0.03	141.19	165.60		328.87	14.35	19.85	28.82		58.51	10.96	11.86	200.07	2.60	6.87	9.93		Pumic.
LL3-12	52.61	0.77	13.05	4.09	0.09		1.84	2.77	0.07	158.37	232.23		350.26	17.68	20.78	14.14		64.91	11.30	15.96	64.73	3.75	6.43	11.44		Pumic.
LL3-13	57.80	0.78	12.54	3.89	0.08		2.02	3.16	0.14	182.16	207.68		362.35	17.95	15.45	24.28		66.30	11.38	15.52	71.79		2.96	10.03	10.74	Pumic.
LL4-8	58.25	0.76	12.47	3.81	0.08		1.98	3.20	0.06	188.38	190.02		350.76	17.05	23.46	5.67		60.13	12.53	13.51		2.82	3.51	11.96	6.15	Pumic.
LL4-12	51.91	0.83	15.89	4.41	0.08		1.97	2.36	0.18	143.92	219.14		394.43	17.20	23.31	25.04		55.66	11.19	14.99	399.04		3.79	9.91	6.77	Pumic.
LL4-14	57.02	0.77	12.55	3.99	0.08		1.98	3.01		80.04	244.72		365.90	17.56	10.13	14.20		58.43	12.93	15.44	165.08		10.65	14.78		Pumic.
LL4-17	62.99	0.83	13.21	3.79	0.08		2.10	3.59	0.15	220.43	183.14		353.61	17.53	24.82	18.64		47.20	14.44	15.87			4.72	13.44	6.31	Pumic.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%					µg.g ⁻¹																				
LL4-27	61.08	0.71	11.87	3.51	0.08		1.81	3.72	0.03	96.23	164.37		384.86	19.45	8.34	20.53		57.11	13.06	17.85	94.82	4.62	8.19	12.84	5.54	Pumic.
LL4-33	66.25	0.74	13.74	3.64	0.08		1.89	3.63	0.14	202.69	168.85		373.98	18.12	18.56	16.69		62.05	12.76	16.38		5.59	2.50	11.36	11.96	Pumic.
LL5-3	47.50	0.79	12.20	3.95	0.08		1.79	2.83	0.07	175.05	198.98		362.79	17.60	7.04	9.84		45.40	13.50	12.66	192.25	5.05	4.32	12.56	8.22	Pumic.
LL5-6	48.64	0.88	16.58	4.47	0.08		1.76	2.32	0.12	138.83	179.75		376.08	18.17	11.27	19.24		61.36	10.90	15.69		3.54	5.81	10.50		Pumic.
LL5-8	55.48	0.85	14.61	4.42	0.08		1.96	2.60	0.14	148.59	169.31		286.72	13.25	31.31	21.18		72.03	8.45	19.48	384.45		4.92	6.99	6.08	Pumic.
LL5-9	56.78	0.81	13.57	4.25	0.09		2.10	2.88	0.08	172.31	212.01		318.78	14.27	24.95	24.11		59.48	8.70	14.23	372.06		7.90	7.68		Pumic.
LL5-11	48.11	0.89	12.26	4.44	0.09		1.51	2.89	0.04	95.08	154.07	701.61	424.65	20.81	26.81	28.14		52.25	17.04	17.70	416.57		7.63	17.33	5.49	Pumic.
LL5-12	48.98	0.84	10.97	4.42	0.08		2.29	2.80	0.08	182.61	251.15		348.11	17.24	24.18			53.24	14.16	12.62	276.84	6.69	5.15	13.94	7.94	Pumic.
LL5-15	57.03	0.92	13.02	4.42	0.09		2.43	2.87	0.17	177.10	219.42		338.42	16.17	44.46	31.19		62.51	9.95	15.69		3.81	3.97	8.48	5.93	Pumic.
LL5-16	53.08	1.09	13.72	5.10	0.09		2.97	2.56	0.14	145.85	299.65		295.62	15.21	62.00	30.83		63.45	9.02	11.45	363.04		3.53	6.83	4.99	Pumic.
LL5-17	55.82	0.82	12.69	4.06	0.09		1.97	3.38	0.02	188.20	204.00		383.99	19.82	14.35	25.68		55.10	11.86	17.25			8.00	11.71		Pumic.
LL5-20	53.23	0.94	17.82	4.70	0.10		1.98	1.97	0.26	124.13	197.68		354.46	15.77	31.83	24.86		60.20	11.16	18.67	260.44		5.31	10.73		Pumic.
LL5-24	61.31	1.11	14.11	5.02	0.09	1.27	2.88	2.56	0.12	133.39	269.09		315.78	14.70	42.69	48.05		64.03	8.30	11.13	198.16		4.77	6.58	4.23	Pumic.
LL5-35	56.25	0.86	11.21	4.27	0.09		2.37	3.10	0.07	183.84	212.99		325.28	15.81	29.81	20.73		58.06	9.51	12.77			6.76	9.52		Pumic.
LL6-1	47.49	0.85	13.13	4.49	0.08		1.83	2.42	0.03	153.02	200.01		370.41	19.37	26.11	32.96		59.17	10.13	19.23	291.66		4.63	9.07	5.52	Pumic.
LL6-3	54.22	0.91	15.15	4.64	0.08		1.94	2.67	0.03	158.37	225.60		392.05	19.37	21.23	25.80		55.04	12.12	22.01			6.02	12.35		Pumic.
LL6-5	57.84	0.83	14.42	4.22	0.08		1.94	2.90	0.03	144.96	181.05		369.61	16.99	10.37	24.82		54.05	11.16	16.78			6.49	10.40		Pumic.
LL6-6	55.59	0.81	12.98	4.03	0.08		2.09	2.68	0.09	157.78	223.89		351.70	16.54	17.47	14.10		52.19	10.42	15.78	270.98		4.28	8.90	6.28	Pumic.
LL6-7	53.99	0.83	14.28	4.41	0.08		2.00	2.48	0.10	156.13	206.19		363.54	16.14	22.47	24.15		47.95	10.13	16.77	78.04	4.24	5.03	9.63		Pumic.
LL6-9	49.42	0.83	15.60	4.72	0.09		1.79	2.30	0.12	145.57	182.83		391.00	17.64	28.35	18.87		45.94	10.17	13.71	244.33	3.40	5.25	8.29	5.54	Pumic.
LL6-10	54.53	0.77	13.62	4.30	0.10		1.91	2.84	0.19	175.35	198.34		368.22	17.42	24.04	37.43		68.09	11.17	15.80	491.46	5.78	5.66	9.74	5.65	Pumic.
LL6-15	55.17	1.01	13.75	4.71	0.09		2.48	2.84	0.15	143.87	235.31		321.70	15.92	47.67	24.19		60.63	10.10	11.94	250.55		4.41	7.86		Pumic.
LL6-16	53.17	0.88	13.08	4.27	0.09		2.09	3.46	0.10	181.76	217.69		395.70	19.62	10.34	18.43		64.57	15.52	17.36	421.29		2.94	15.58	8.46	Pumic.
LL6-24	67.70	0.64	12.93	3.12	0.08	0.85	2.20	3.58	0.17	204.29	212.38		361.47	16.88	11.95	7.14		37.81	15.01	53.73			6.33	14.77	6.66	Pumic.
LL6-25	58.68	0.67	11.73	3.30	0.07		1.80	3.78	0.15	212.87	148.32		356.30	18.15	10.95	13.20		47.93	14.91	12.02		4.79	3.82	13.44	10.20	Pumic.
LL6-28	56.19	0.82	12.52	3.97	0.09		1.97	3.07	0.11	189.11	204.15		380.39	19.48	18.20	18.29		61.02	12.44	14.48		3.91	4.52	12.03	5.02	Pumic.
LL7-1	56.40	0.90	15.55	4.49	0.09		2.39	2.02	0.13	132.05	269.10		314.91	12.91	29.32	31.69		55.61	10.55	13.31	359.01		3.84	9.86		Pumic.
LL7-3	60.74	0.72	14.08	3.83	0.08		1.90	3.15	0.05	183.60	203.39		366.06	17.69	3.87	19.69		53.77	11.42	14.21	63.55		6.31	9.74	6.18	Pumic.
LL7-5	57.17	0.81	12.11	4.05	0.08		1.92	2.91	0.09	157.64	186.84		340.35	13.97	19.59	33.05		51.39	13.28	13.05	522.20	2.89	2.86	11.75	5.77	Pumic.
LL7-16	47.90	0.84	11.68	4.28	0.09		1.86	3.21	0.07	169.46	187.06		377.94	19.31	18.76	12.76		63.44	12.64	13.33			2.72	10.98	9.38	Pumic.
LL7-18	42.62	1.16	12.07	5.72	0.10		2.71	1.38	0.10	112.44	302.95		295.18	13.42	57.45	33.13		64.71	7.92	12.87	340.97		3.91	7.20		Pumic.
LL7-29	54.18	0.77	11.82	4.08	0.08		2.01	3.13	0.10	187.75	199.54		376.66	20.36	10.59	13.65		63.56	12.60	15.54	230.27	3.08	4.01	11.19	8.25	Pumic.
LL7-31	61.80	0.78	13.23	3.57	0.08		1.77	3.41	0.19	214.11	151.04		383.54	20.71	19.11			55.82	15.18	16.73	139.09	3.51	4.48	13.87	7.72	Pumic.
LL7-32	50.57	1.36	16.15	6.06	0.11		3.21	1.67	0.31	113.08	325.17		284.33	11.97	86.32	30.79		72.84	6.86	11.19	794.32		3.27	4.62		Pumic.
LL7-33	31.07	1.05	7.93	4.93	0.09		2.36	1.61	0.09	117.11	272.79	922.21	288.72	12.78	41.45			69.40	6.85	13.96	244.47		3.99	6.81		Pumic.
LL7-34	57.92	0.81	13.19	3.70	0.08		1.90	3.17	0.24	196.21	159.27		378.56	18.75	16.80	22.19		48.23	14.23	20.08	87.31		4.28	14.21	8.51	Pumic.
LL8-6	58.09	0.75	13.16	3.91	0.08		1.99	3.10	0.01	173.16	188.40		341.62	15.89		20.57		52.26	10.07	17.12	239.95		8.05	10.03		Pumic.
LL8-10	64.94	0.74	13.48	3.70	0.08		1.99	3.41	0.09	198.12	196.97		352.80	17.80	17.77	18.88		54.93	11.88	14.67	0.00		6.15	10.23		Pumic.
LL8-11	52.16	0.91	15.21	4.46	0.09		1.97	2.60	0.11	155.77	243.07		380.86	18.07	27.95	19.03		63.47	14.16	16.54	167.86			14.00	6.64	Pumic.
LL8-12	59.75	0.81	15.58	4.15	0.08		2.19	3.24	0.11	177.03	189.23		328.21	16.43	17.63	21.07		53.16	10.69	15.05	245.38	5.06	3.23	9.12	7.88	Pumic.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%																µg·g ⁻¹									
LL8-13	45.37	1.04	13.93	5.19	0.09	0.63	1.94	2.09	0.06	122.17	200.18		369.82	17.80	36.42	38.70		72.22	13.79	14.13	227.51		3.87	13.32	5.26	Pumic.
LL8-14	61.63	0.73	13.21	3.79	0.08		1.91	3.47	0.07	191.59	186.57		370.27	17.47	10.70	18.23		56.87	12.69	14.49	314.47		2.80	11.78	10.42	Pumic.
LL8-20	50.45	1.22	14.83	5.44	0.10		2.58	2.07	0.19	115.53	226.66		310.09	15.44	50.16	39.51		76.86	8.28	11.51			4.69	7.03		Pumic.
LL9-4	59.77	0.75	12.49	3.73	0.08		1.96	3.20	0.05	188.67	195.41		348.35	16.83	4.89			56.46	11.65	14.89			3.51	11.75	6.73	Pumic.
LL9-6	56.68	0.69	11.91	3.70	0.08		1.93	3.14	0.07	187.70	206.80		355.55	17.83	12.46			60.05	11.75	14.30	183.57	6.30	3.15	10.69	6.62	Pumic.
Willx-01	65.01	0.67	15.47	3.89	0.08	0.76	2.23	3.15	0.17	91.00	225.00	758.00	406.00	18.00	25.00		0.00	56.00	11.50	15.00	0.00	2.60	4.50	0.00	3.50	Pumic.
LL9-8	62.17	0.80	13.22	4.24	0.09		2.27	3.10	0.10	188.76	229.02		342.79	15.47	22.02	12.22		59.36	12.80	15.55	186.79	3.35	8.23	12.49	5.55	Pumic.
LL9-10	63.28	0.48	12.21	2.44	0.07		1.10	4.41	0.08	129.83	72.24		366.09	17.91				31.36	19.45	18.19	162.71	3.93	6.19	18.52	15.83	Pumic.
LL9-13	56.79	0.69	11.32	3.45	0.07		1.85	3.91	0.04	191.85	146.76		319.63	15.50	20.91	13.14		40.94	12.41	13.56			5.72	11.18	6.93	Pumic.
LL9-14	59.06	0.69	12.84	3.43	0.07		1.77	4.43	0.07	217.70	153.89		376.15	18.62	4.97	2.80		43.59	15.31	16.13		3.10	6.82	14.44	7.22	Pumic.
LL9-16	57.65	0.74	12.32	3.40	0.07		2.05	3.92	0.12	208.01	186.79		353.95	17.53	7.78	1.60		38.89	13.48	13.35		3.51	4.80	11.78	7.84	Pumic.
LL9-21	50.39	1.52	13.63	6.25	0.10	0.77	3.37	1.85	0.24	123.87	328.51		327.06	20.97	102.02	63.13	24.09	82.01	9.36	11.03				8.06		Pumic.
LL2-10	57.98	0.79	13.98	4.05	0.08	0.80	2.02	3.24	0.08	177.24	192.23		360.72	17.39	6.08	21.49		65.90	11.39	14.23		3.99	6.48	10.31	4.52	Pumic.
LL2-12	57.06	0.80	14.69	4.14	0.09		2.08	2.95	0.10	178.09	272.13		391.93	19.56	11.38	21.70		66.56	14.05	16.76		3.00	6.24	13.76	4.86	Pumic.
LL2-13	56.93	0.81	14.68	4.11	0.09		1.95	2.67	0.07	164.54	206.63		377.51	19.15	12.35	17.20		64.75	13.83	16.82	242.12		3.55	12.99	6.74	Pumic.
LL2-15	55.19	0.99	13.09	4.77	0.09	1.13	4.01	2.81	0.12	160.23	360.55		272.84	11.22	45.22	43.17		52.24	7.66	7.48	107.60	2.93	4.76	6.75		Pumic.
LL2-18	51.27	0.85	11.20	4.53	0.09		2.40	2.84	0.08	169.68	243.26		329.03	15.26	17.70	23.43		62.63	9.15	13.43	183.72	3.08	7.21	7.77		Pumic.
LL2-30	60.97	0.92	14.51	4.52	0.09		2.40	2.92	0.14	178.02	226.11		315.30	14.56	27.74	24.32		52.17	11.05	15.15	244.87	5.58	6.92	10.91		Pumic.
LL2-32	57.62	0.72	12.47	3.82	0.08		1.89	3.29	0.02	200.14	191.94		384.01	20.58	8.50			60.04	14.08	15.32			4.91	13.75	5.01	Pumic.
LL3-1	56.00	0.80	13.85	4.00	0.09	0.99	2.03	2.84	0.13	159.73	201.49		374.88	17.88	5.50	20.64		62.83	10.97	17.10			2.84	9.16	7.15	Pumic.
LL3-3	57.05	0.81	14.53	4.18	0.08		2.02	2.82	0.06	168.21	216.91		350.29	16.60	6.28	12.77		66.38	10.85	17.79	106.53		7.47	10.80		Pumic.
LL3-8	54.67	0.78	12.37	3.92	0.08		1.98	3.03	0.07	161.74	187.41		346.90	16.52	19.12	21.06		58.46	11.54	15.01	248.44		4.78	10.53	7.55	Pumic.
LL3-9	54.02	0.81	14.10	4.16	0.08	1.04	1.94	2.82	0.03	141.19	165.60		328.87	14.35	19.85	28.82		58.51	10.96	11.86	200.07	2.60	6.87	9.93		Pumic.
LL3-12	52.61	0.77	13.05	4.09	0.09		1.84	2.77	0.07	158.37	232.23		350.26	17.68	20.78	14.14		64.91	11.30	15.96	64.73	3.75	6.43	11.44		Pumic.
LL3-13	57.80	0.78	12.54	3.89	0.08		2.02	3.16	0.14	182.16	207.68		362.35	17.95	15.45	24.28		66.30	11.38	15.52	71.79		2.96	10.03	10.74	Pumic.
LL4-8	58.25	0.76	12.47	3.81	0.08		1.98	3.20	0.06	188.38	190.02		350.76	17.05	23.46	5.67		60.13	12.53	13.51		2.82	3.51	11.96	6.15	Pumic.
LL4-12	51.91	0.83	15.89	4.41	0.08		1.97	2.36	0.18	143.92	219.14		394.43	17.20	23.31	25.04		55.66	11.19	14.99	399.04		3.79	9.91	6.77	Pumic.
LL4-14	57.02	0.77	12.55	3.99	0.08		1.98	3.01		80.04	244.72		365.90	17.56	10.13	14.20		58.43	12.93	15.44	165.08		10.65	14.78		Pumic.
LL4-17	62.99	0.83	13.21	3.79	0.08		2.10	3.59	0.15	220.43	183.14		353.61	17.53	24.82	18.64		47.20	14.44	15.87			4.72	13.44	6.31	Pumic.
LL4-27	61.08	0.71	11.87	3.51	0.08		1.81	3.72	0.03	96.23	164.37		384.86	19.45	8.34	20.53		57.11	13.06	17.85	94.82	4.62	8.19	12.84	5.54	Pumic.
LL4-33	66.25	0.74	13.74	3.64	0.08		1.89	3.63	0.14	202.69	168.85		373.98	18.12	18.56	16.69		62.05	12.76	16.38		5.59	2.50	11.36	11.96	Pumic.
LL5-3	47.50	0.79	12.20	3.95	0.08		1.79	2.83	0.07	175.05	198.98		362.79	17.60	7.04	9.84		45.40	13.50	12.66	192.25	5.05	4.32	12.56	8.22	Pumic.
LL5-6	48.64	0.88	16.58	4.47	0.08		1.76	2.32	0.12	138.83	179.75		376.08	18.17	11.27	19.24		61.36	10.90	15.69		3.54	5.81	10.50		Pumic.
LL5-8	55.48	0.85	14.61	4.42	0.08		1.96	2.60	0.14	148.59	169.31		286.72	13.25	31.31	21.18		72.03	8.45	19.48	384.45		4.92	6.99	6.08	Pumic.
LL5-9	56.78	0.81	13.57	4.25	0.09		2.10	2.88	0.08	172.31	212.01		318.78	14.27	24.95	24.11		59.48	8.70	14.23	372.06		7.90	7.68		Pumic.
LL5-11	48.11	0.89	12.26	4.44	0.09		1.51	2.89	0.04	95.08	154.07	701.61	424.65	20.81	26.81	28.14		52.25	17.04	17.70	416.57		7.63	17.33	5.49	Pumic.
LL5-12	48.98	0.84	10.97	4.42	0.08		2.29	2.80	0.08	182.61	251.15		348.11	17.24	24.18			53.24	14.16	12.62	276.84	6.69	5.15	13.94	7.94	Pumic.
LL5-15	57.03	0.92	13.02	4.42	0.09		2.43	2.87	0.17	177.10	219.42		338.42	16.17	44.46	31.19		62.51	9.95	15.69		3.81	3.97	8.48	5.93	Pumic.
LL5-16	53.08	1.09	13.72	5.10	0.09		2.97	2.56	0.14	145.85	299.65		295.62	15.21	62.00	30.83		63.45	9.02	11.45	363.04		3.53	6.83	4.99	Pumic.
LL5-17	55.82	0.82	12.69	4.06	0.09		1.97	3.38	0.02	188.20	204.00		383.99	19.82	14.35	25.68		55.10	11.86	17.25			8.00	11.71		Pumic.

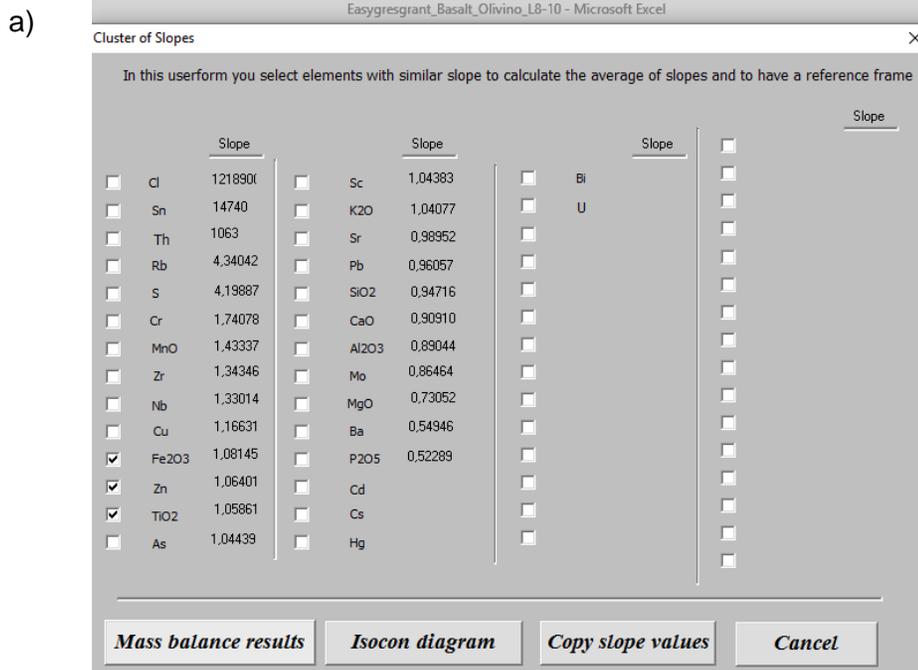
Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%																								μg.g ⁻¹	
LL5-20	53.23	0.94	17.82	4.70	0.10		1.98	1.97	0.26	124.13	197.68		354.46	15.77	31.83	24.86		60.20	11.16	18.67	260.44		5.31	10.73		Pumic.
LL5-24	61.31	1.11	14.11	5.02	0.09	1.27	2.88	2.56	0.12	133.39	269.09		315.78	14.70	42.69	48.05		64.03	8.30	11.13	198.16		4.77	6.58	4.23	Pumic.
LL5-35	56.25	0.86	11.21	4.27	0.09		2.37	3.10	0.07	183.84	212.99		325.28	15.81	29.81	20.73		58.06	9.51	12.77			6.76	9.52		Pumic.
LL6-1	47.49	0.85	13.13	4.49	0.08		1.83	2.42	0.03	153.02	200.01		370.41	19.37	26.11	32.96		59.17	10.13	19.23	291.66		4.63	9.07	5.52	Pumic.
LL6-3	54.22	0.91	15.15	4.64	0.08		1.94	2.67	0.03	158.37	225.60		392.05	19.37	21.23	25.80		55.04	12.12	22.01			6.02	12.35		Pumic.
LL6-5	57.84	0.83	14.42	4.22	0.08		1.94	2.90	0.03	144.96	181.05		369.61	16.99	10.37	24.82		54.05	11.16	16.78			6.49	10.40		Pumic.
LL6-6	55.59	0.81	12.98	4.03	0.08		2.09	2.68	0.09	157.78	223.89		351.70	16.54	17.47	14.10		52.19	10.42	15.78	270.98		4.28	8.90	6.28	Pumic.
LL6-7	53.99	0.83	14.28	4.41	0.08		2.00	2.48	0.10	156.13	206.19		363.54	16.14	22.47	24.15		47.95	10.13	16.77	78.04	4.24	5.03	9.63		Pumic.
LL6-9	49.42	0.83	15.60	4.72	0.09		1.79	2.30	0.12	145.57	182.83		391.00	17.64	28.35	18.87		45.94	10.17	13.71	244.33	3.40	5.25	8.29	5.54	Pumic.
LL6-10	54.53	0.77	13.62	4.30	0.10		1.91	2.84	0.19	175.35	198.34		368.22	17.42	24.04	37.43		68.09	11.17	15.80	491.46	5.78	5.66	9.74	5.65	Pumic.
LL6-15	55.17	1.01	13.75	4.71	0.09		2.48	2.84	0.15	143.87	235.31		321.70	15.92	47.67	24.19		60.63	10.10	11.94	250.55		4.41	7.86		Pumic.
LL6-16	53.17	0.88	13.08	4.27	0.09		2.09	3.46	0.10	181.76	217.69		395.70	19.62	10.34	18.43		64.57	15.52	17.36	421.29		2.94	15.58	8.46	Pumic.
LL6-24	67.70	0.64	12.93	3.12	0.08	0.85	2.20	3.58	0.17	204.29	212.38		361.47	16.88	11.95	7.14		37.81	15.01	53.73			6.33	14.77	6.66	Pumic.
LL6-25	58.68	0.67	11.73	3.30	0.07		1.80	3.78	0.15	212.87	148.32		356.30	18.15	10.95	13.20		47.93	14.91	12.02		4.79	3.82	13.44	10.20	Pumic.
LL6-28	56.19	0.82	12.52	3.97	0.09		1.97	3.07	0.11	189.11	204.15		380.39	19.48	18.20	18.29		61.02	12.44	14.48		3.91	4.52	12.03	5.02	Pumic.
LL7-1	56.40	0.90	15.55	4.49	0.09		2.39	2.02	0.13	132.05	269.10		314.91	12.91	29.32	31.69		55.61	10.55	13.31	359.01		3.84	9.86		Pumic.
LL7-3	60.74	0.72	14.08	3.83	0.08		1.90	3.15	0.05	183.60	203.39		366.06	17.69	3.87	19.69		53.77	11.42	14.21	63.55		6.31	9.74	6.18	Pumic.
LL7-5	57.17	0.81	12.11	4.05	0.08		1.92	2.91	0.09	157.64	186.84		340.35	13.97	19.59	33.05		51.39	13.28	13.05	522.20	2.89	2.86	11.75	5.77	Pumic.
LL7-16	47.90	0.84	11.68	4.28	0.09		1.86	3.21	0.07	169.46	187.06		377.94	19.31	18.76	12.76		63.44	12.64	13.33			2.72	10.98	9.38	Pumic.
LL7-18	42.62	1.16	12.07	5.72	0.10		2.71	1.38	0.10	112.44	302.95		295.18	13.42	57.45	33.13		64.71	7.92	12.87	340.97		3.91	7.20		Pumic.
LL7-29	54.18	0.77	11.82	4.08	0.08		2.01	3.13	0.10	187.75	199.54		376.66	20.36	10.59	13.65		63.56	12.60	15.54	230.27	3.08	4.01	11.19	8.25	Pumic.
LL7-31	61.80	0.78	13.23	3.57	0.08		1.77	3.41	0.19	214.11	151.04		383.54	20.71	19.11			55.82	15.18	16.73	139.09	3.51	4.48	13.87	7.72	Pumic.
LL7-32	50.57	1.36	16.15	6.06	0.11		3.21	1.67	0.31	113.08	325.17		284.33	11.97	86.32	30.79		72.84	6.86	11.19	794.32		3.27	4.62		Pumic.
LL7-33	31.07	1.05	7.93	4.93	0.09		2.36	1.61	0.09	117.11	272.79	922.21	288.72	12.78	41.45			69.40	6.85	13.96	244.47		3.99	6.81		Pumic.
LL7-34	57.92	0.81	13.19	3.70	0.08		1.90	3.17	0.24	196.21	159.27		378.56	18.75	16.80	22.19		48.23	14.23	20.08	87.31		4.28	14.21	8.51	Pumic.
LL8-6	58.09	0.75	13.16	3.91	0.08		1.99	3.10	0.01	173.16	188.40		341.62	15.89		20.57		52.26	10.07	17.12	239.95		8.05	10.03		Pumic.
LL8-10	64.94	0.74	13.48	3.70	0.08		1.99	3.41	0.09	198.12	196.97		352.80	17.80	17.77	18.88		54.93	11.88	14.67	0.00		6.15	10.23		Pumic.
LL8-11	52.16	0.91	15.21	4.46	0.09		1.97	2.60	0.11	155.77	243.07		380.86	18.07	27.95	19.03		63.47	14.16	16.54	167.86			14.00	6.64	Pumic.
LL8-12	59.75	0.81	15.58	4.15	0.08		2.19	3.24	0.11	177.03	189.23		328.21	16.43	17.63	21.07		53.16	10.69	15.05	245.38	5.06	3.23	9.12	7.88	Pumic.
LL8-13	45.37	1.04	13.93	5.19	0.09	0.63	1.94	2.09	0.06	122.17	200.18		369.82	17.80	36.42	38.70		72.22	13.79	14.13	227.51		3.87	13.32	5.26	Pumic.
LL8-14	61.63	0.73	13.21	3.79	0.08		1.91	3.47	0.07	191.59	186.57		370.27	17.47	10.70	18.23		56.87	12.69	14.49	314.47		2.80	11.78	10.42	Pumic.
Willx-01	65.01	0.67	15.47	3.89	0.08	0.76	2.23	3.15	0.17	91.00	225.00	758.00	406.00	18.00	25.00		0.00	56.00	11.50	15.00	0.00	2.60	4.50	0.00	3.50	Pumic.
LL8-20	50.45	1.22	14.83	5.44	0.10		2.58	2.07	0.19	115.53	226.66		310.09	15.44	50.16	39.51		76.86	8.28	11.51			4.69	7.03		Pumic.
LL9-4	59.77	0.75	12.49	3.73	0.08		1.96	3.20	0.05	188.67	195.41		348.35	16.83	4.89			56.46	11.65	14.89			3.51	11.75	6.73	Pumic.
LL9-6	56.68	0.69	11.91	3.70	0.08		1.93	3.14	0.07	187.70	206.80		355.55	17.83	12.46			60.05	11.75	14.30	183.57	6.30	3.15	10.69	6.62	Pumic.
LL9-8	62.17	0.80	13.22	4.24	0.09		2.27	3.10	0.10	188.76	229.02		342.79	15.47	22.02	12.22		59.36	12.80	15.55	186.79	3.35	8.23	12.49	5.55	Pumic.
LL9-10	63.28	0.48	12.21	2.44	0.07		1.10	4.41	0.08	129.83	72.24		366.09	17.91				31.36	19.45	18.19	162.71	3.93	6.19	18.52	15.83	Pumic.
LL9-13	56.79	0.69	11.32	3.45	0.07		1.85	3.91	0.04	191.85	146.76		319.63	15.50	20.91	13.14		40.94	12.41	13.56			5.72	11.18	6.93	Pumic.
LL9-14	59.06	0.69	12.84	3.43	0.07		1.77	4.43	0.07	217.70	153.89		376.15	18.62	4.97	2.80		43.59	15.31	16.13		3.10	6.82	14.44	7.22	Pumic.
LL9-16	57.65	0.74	12.32	3.40	0.07		2.05	3.92	0.12	208.01	186.79		353.95	17.53	7.78	1.60		38.89	13.48	13.35		3.51	4.80	11.78	7.84	Pumic.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%											µg.g ⁻¹														
LL9-21	50.39	1.52	13.63	6.25	0.10	0.77	3.37	1.85	0.24	123.87	328.51		327.06	20.97	102.02	63.13	24.09	82.01	9.36	11.03				8.06		Pumic.
LL17-6	52.23	1.08	15.46	5.59	0.10	0.76	3.27	2.19	0.16	125.73	288.22		320.85	12.51	50.81	34.55		56.13	8.49	13.11	227.58	3.71	2.64	7.06		Pumic.
LL17-7	55.48	0.95	16.42	4.70	0.10		2.21	2.31	0.18	147.64	230.82		376.26	18.19	36.44	26.77		60.80	12.12	14.40	72.99		4.94	11.79		Pumic.
LL17-9	53.53	1.38	14.57	6.12	0.10	0.72	3.25	2.19	0.18	125.75	309.83		312.44	15.58	68.54	39.52		76.72	8.73	11.70	88.04			7.24	4.31	Pumic.
LL17-10	61.34	0.78	11.91	3.58	0.08		1.82	3.43	0.10	203.35	173.54		338.36	15.82	19.64	11.34		45.87	11.52	17.19	2516.66		5.23	10.73	10.34	Pumic.
LL17-13	91.41	1.38	2.73	0.87	0.05		0.59	0.33	0.24	18.97	24.87		442.37	22.07	18.05				2.00	0.64	1528.83		3.77			Pumic.
LL17-14	77.10	1.40	5.89	2.08	0.05		1.09	1.22	0.14	58.20	91.91		281.96	13.44	19.63			14.41	2.73	4.25	842.11		6.22			Pumic.
LL17-20	71.30	2.13	8.36	3.02	0.06		1.18	1.49	0.24	97.17	229.91		355.35	16.76	94.63	13.86		23.47	4.64	12.39	9541.00		4.66			Pumic.
LL17-34	56.53	0.70	11.80	2.19	0.06	0.91	1.13	2.93	0.14	132.14	312.09		319.36	13.78	13.55	12.19		15.75	12.58	53.45	42152.88	5.69	5.37	11.24		Pumic.
LL17-35	75.15	0.85	8.37	2.48	0.05		0.98	1.80	0.06	119.56	130.72		334.16	15.92	10.31	4.58		16.82	7.35	11.03	12810.09	11.64	7.44	6.57	3.57	Pumic.
LL18-1	56.11	1.18	13.55	5.50	0.10		3.06	2.67	0.15	155.16	285.52		327.07	15.53	64.40	35.92		69.15	9.35	13.32	1025.35		4.93	7.86	5.81	Pumic.
LL18-4	46.22	0.91	20.43	5.01	0.09		1.78	1.76	0.20	113.60	182.27		413.10	19.75	44.42	18.27		38.71	12.50	14.21	287.15	4.90	3.95	11.94	4.21	Pumic.
LL18-6	46.51	0.84	13.93	4.48	0.11		1.90	2.26	0.19	148.82	214.60		375.19	16.99	24.99	24.11		60.93	9.77	18.12	301.68	4.97	5.93	9.75		Pumic.
LL18-7	48.36	1.36	14.81	6.38	0.10		3.19	2.02	0.06	124.77	315.00		311.88	14.67	71.81	32.62	20.66	70.35	8.08	13.54	218.17		6.70	7.79		Pumic.
LL18-8	56.83	0.91	13.66	4.45	0.09		2.24	2.90	0.12	168.97	203.76		331.39	15.25	22.46	20.07		58.49	8.20	15.49	191.24		4.63	7.29	4.08	Pumic.
LL18-10	53.24	1.06	13.13	2.41	0.05		0.77	2.97	0.07	59.64	382.41		269.28	12.37	34.59			8.38	9.96	12.88	59417.48		5.97	8.91		Pumic.
LL18-11	59.74	0.83	12.83	3.76	0.08		1.85	3.36	0.26	177.50	167.70		328.16	15.68	26.15	8.13		47.84	12.35	10.99	3803.76	4.15	3.46	10.35	6.25	Pumic.
LL18-12	40.19	0.75	9.11	3.86	0.08		1.83	2.19	0.07	143.14	183.02		312.12	12.67	27.03			47.02	10.97	13.32	943.27		4.59	9.56	5.61	Pumic.
LL18-14	58.27	0.93	12.90	4.34	0.09		2.29	3.23	0.14	182.80	202.76		338.27	16.43	31.67	11.86		54.87	13.08	15.52	1035.64		5.27	12.39	5.31	Pumic.
LL18-15	66.48	1.41	9.14	3.19	0.06		1.36	1.76	0.22	89.26	218.47		299.45	14.05	44.42	1.85		25.27	7.25	9.57	13587.25	6.81	7.56	6.39		Pumic.
LL18-18	47.16	1.37	16.23	6.20	0.10		2.21	1.42	0.13	105.28	267.46		330.45	17.48	63.31	52.60		68.75	8.43	15.22				7.05		Pumic.
LL18-19	52.00	1.21	14.77	5.04	0.09		2.03	2.49	0.06	148.89	220.69		333.30	17.24	39.88	34.26		56.91	9.52	12.56	2812.89	4.89	5.61	8.54		Pumic.
LL18-21	70.99	0.89	8.96	2.98	0.06		1.29	1.88	0.04	131.32	109.87		356.84	17.40	4.94			31.15	7.67	11.92	1174.80		7.29	5.91		Pumic.
LL19-1	52.27	0.97	17.51	4.77	0.09		2.03	2.10	0.20	130.77	229.79		363.57	17.37	27.27	27.16		52.62	12.17	15.33	322.19	4.38	2.72	11.42	6.69	Pumic.
LL19-2	53.31	0.88	17.74	4.55	0.09		2.05	2.34	0.18	149.29	209.20		388.79	16.97	35.94	18.37		55.25	11.48	14.97		4.04		9.70	7.65	Pumic.
LL19-3	50.25	0.99	16.77	4.79	0.08		2.30	1.86	0.18	115.10	241.52		330.18	16.44	45.08	38.54		51.14	9.75	13.83	333.03	3.25		8.86		Pumic.
LL19-4	49.47	0.87	18.05	4.73	0.11		2.02	2.08	0.24	124.06	184.51		342.94	14.53	47.04	19.10		41.57	9.53	13.00			4.66	7.88	4.39	Pumic.
LL19-5	50.56	1.02	14.89	5.09	0.09		2.26	2.26	0.15	140.83	237.07		344.90	15.85	50.53	23.07		49.29	10.15	13.30	219.68			8.20	6.98	Pumic.
LL19-6	53.34	1.16	16.53	5.58	0.10		2.89	2.19	0.23	135.20	255.12		341.94	15.57	50.56	37.30		59.86	8.02	11.99		4.08		6.31	4.84	Pumic.
LL19-9	55.33	0.86	12.22	4.26	0.09		2.19	2.98	0.07	177.33	209.88		352.78	17.26	26.77	20.64		53.34	12.14	15.41			4.40	11.08		Pumic.
LL19-10	60.76	0.76	12.55	3.64	0.08		1.88	3.51	0.17	216.28	153.46		371.56	18.46	15.78	19.27		47.75	12.88	18.08	92.69	3.96	4.73	11.48	9.88	Pumic.
LL19-13	58.79	0.93	13.67	4.37	0.09	0.66	2.30	3.05	0.09	186.17	239.27		385.45	20.25	18.92	17.19		64.48	12.00	11.88		3.95	10.49	12.42		Pumic.
LL19-35	46.60	1.39	5.11	3.80	0.05		0.57	1.53	0.14	17.63	376.13		250.11	8.82	61.89				8.06	26.26	32394.48		2.44	6.86		Pumic.
LL20-1	50.80	0.85	15.04	4.29	0.10		2.09	2.43	0.28	147.43	210.00		356.62	16.19	42.92	27.63		57.33	10.37	14.21		4.41	3.32	9.96	4.19	Pumic.
LL20-5	44.34	0.92	13.74	4.83	0.09		1.99	2.03	0.19	144.42	225.53		387.17	18.83	28.90	7.63		54.04	12.29	15.51	307.52	4.13	6.08	12.79	4.61	Pumic.
LL20-11	55.51	0.67	12.01	3.55	0.09		1.88	3.32	0.11	99.48	200.98	658.47	391.48	19.62	0.54			45.71	16.68	12.99		4.99	6.43	16.64	7.98	Pumic.
LL20-15	58.24	0.72	11.18	3.45	0.08		1.75	3.48	0.14	217.39	156.55		351.46	16.64	18.51	12.37		52.23	13.84	17.21	452.31	4.28	6.68	12.27	7.25	Pumic.
LL20-17	58.62	1.01	12.27	4.34	0.08		2.30	2.61	0.21	160.32	204.51		316.49	14.38	44.29	23.28		59.82	11.90	14.41	2413.31	3.74	4.13	9.40	7.88	Pumic.
LL1-19	59.56	0.78	11.97	3.37	0.08		1.39	3.33	0.11	217.46	137.41		380.42	18.76	13.55	6.61		38.12	16.04	15.38	492.87	5.44	6.13	16.15	7.17	Pumic.
LL3-26	55.79	1.24	14.58	6.07	0.11		3.79	2.45	0.24	147.81	327.94	675.65	316.04	16.28	74.51	30.11	29.86	69.11	9.92	11.21	365.44		4.42	8.20	5.15	Pumic.

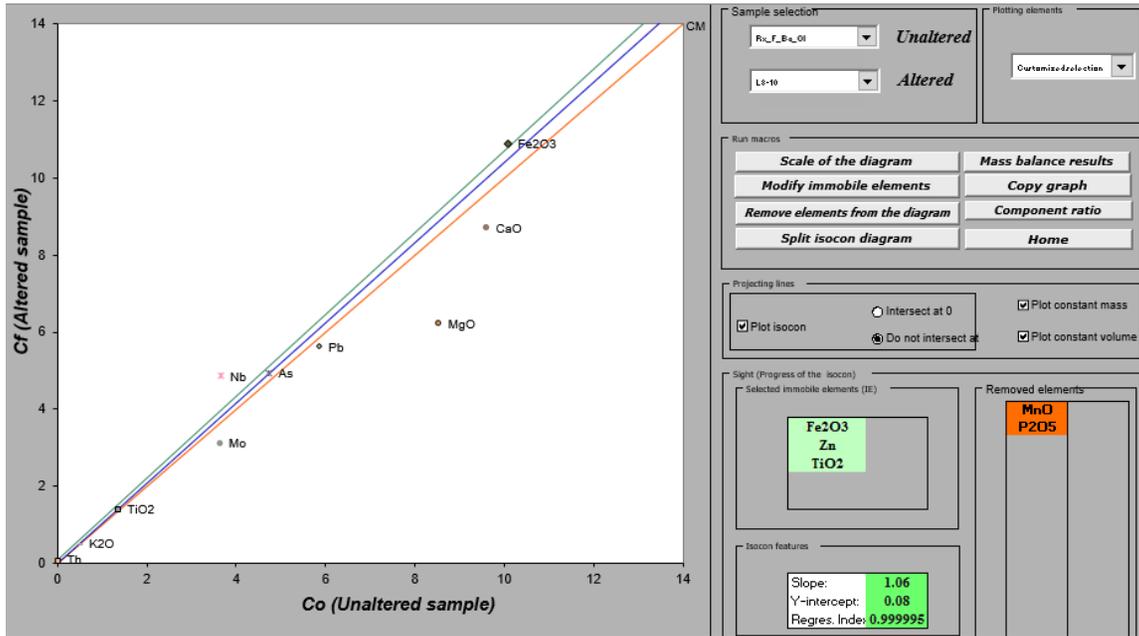
Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	%																µg.g ⁻¹									
LL3-31	66.74	0.57	13.12	2.73	0.07		1.87	3.69	0.14	103.94	167.95		356.41	16.01				28.61	13.64	13.69		4.35	5.15	12.14	9.83	Pumic.
LL3-33	66.27	0.54	12.48	2.65	0.06		1.78	3.79	0.11	107.02	151.25		356.82	15.36	3.38	3.33		28.50	14.73	14.02		3.21	3.79	13.58	13.71	Pumic.
LL5-2	63.44	0.62	13.42	3.82	0.08		1.65	3.66	0.12	106.46	142.31	1102.64	387.46	20.31	7.93	24.95		40.59	16.43	21.67	264.41	3.85	10.64	15.53	9.25	Pumic.
LL5-19	52.47	1.15	16.83	5.38	0.10		2.52	1.29	0.20	109.85	308.13		298.93	14.51	70.50	62.14		71.53	8.69	15.11	496.88		2.86	6.94		Pumic.
LL7-4	59.49	0.77	12.84	3.92	0.08		1.90	3.22	0.13	166.42	194.83		339.38	14.94	10.52	17.96		53.29	10.64	14.28			5.08	8.29	5.83	Pumic.
LL7-8	68.38	0.44	12.19	2.32	0.07		1.12	4.39	0.12	130.16	86.92	617.94	394.88	18.95		4.95		27.42	19.14	14.11	335.08		6.74	19.16	14.21	Pumic.
LL7-9	64.29	0.46	11.52	2.36	0.07		1.00	4.29		139.04	68.08	744.51	369.80	19.58				26.55	22.08	19.83	169.37	5.44	10.90	21.39	10.58	Pumic.
LL7-14	70.50	0.46	13.21	2.45	0.06		1.13	4.31	0.06	126.98	94.15	595.40	365.92	17.79		13.96		24.16	16.84	15.28	364.12	3.23	6.96	15.64	12.46	Pumic.
LL8-8	71.73	0.47	12.71	2.52	0.07		1.06	4.38	0.02	147.27	78.47		373.87	18.87		7.31		22.31	17.87	18.03	84.78	4.64	7.33	16.78	13.18	Pumic.
LL10-34	53.96	1.15	15.12	3.48	0.07		1.23	1.62	0.08	130.33	191.76		305.25	14.69	63.48	15.61		35.23	8.52	8.82	14991.92	4.89	5.34	7.90	5.01	Pumic.
LL13-32	40.34	0.64	9.90	3.36	0.08		14.49	1.64		127.45	262.51		263.81	11.23	8.47	8.93		49.77	7.76	9.02	2595.97	6.47		6.19	6.51	Pumic.
LL15-33	71.26	1.12	7.14	2.30	0.05		0.94	1.54	0.13	74.34	172.76		293.43	10.88	48.59			7.45	8.06	9.35	21736.83		5.39	6.71	3.56	Pumic.
LL17-11	68.73	0.76	9.89	2.69	0.06	0.73	1.21	2.03	0.07	182.05	128.01		353.08	16.64	11.31			30.24	12.02	13.11	6454.38	3.98	7.26	10.63	5.56	Pumic.
LL20-14	57.19	1.00	15.87	4.97	0.10		3.50	2.51	0.28	145.45	321.26	782.06	321.89	15.15	50.36	26.28		67.69	10.89	11.85	291.48		5.77	9.95		Pumic.
Willx-01	65.01	0.67	15.47	3.89	0.08	0.76	2.23	3.15	0.17	91.00	225.00	758.00	406.00	18.00	25.00		0.00	56.00	11.50	15.00	0.00	2.60	4.50	0.00	3.50	Pumic.

ANEXOS IV

Tres son las herramientas que facilitan la hoja de cálculo EASYGRESGRANT para determinar los elementos inmóviles para el cálculo de balance de masas, los cuales son utilizados como marco de referencia para el modelado del balance de masas: I) el cálculo de pendiente de cada uno de los elementos analizados (Figura 47-a), con el cierre de datos cercano al valor de 1 es considerado elemento inmóvil (Grant, 2005; Mukherjee y Gupta, 2008), II) el diagrama de isocona (Figura 47-b) donde los elementos con composición-volumen similar pueden ser usados para la selección de elementos inmóviles, cuya comprobación se lleva a cabo por un método de regresión de mínimos cuadrados, III) el diagrama de relación de componentes (Figura 47-c), donde se grafican las relaciones de elementos de las rocas alterados e inalterados, los elementos inmóviles aparecerán encima de la línea de proporción 1:1, mientras que los elementos móviles estarán alejados de la línea 1:1 (Lopez-Moro.,2012), lo anteriormente mencionado se ejemplifica con la muestra regional L8-10 (Figura 47).



b)



c)

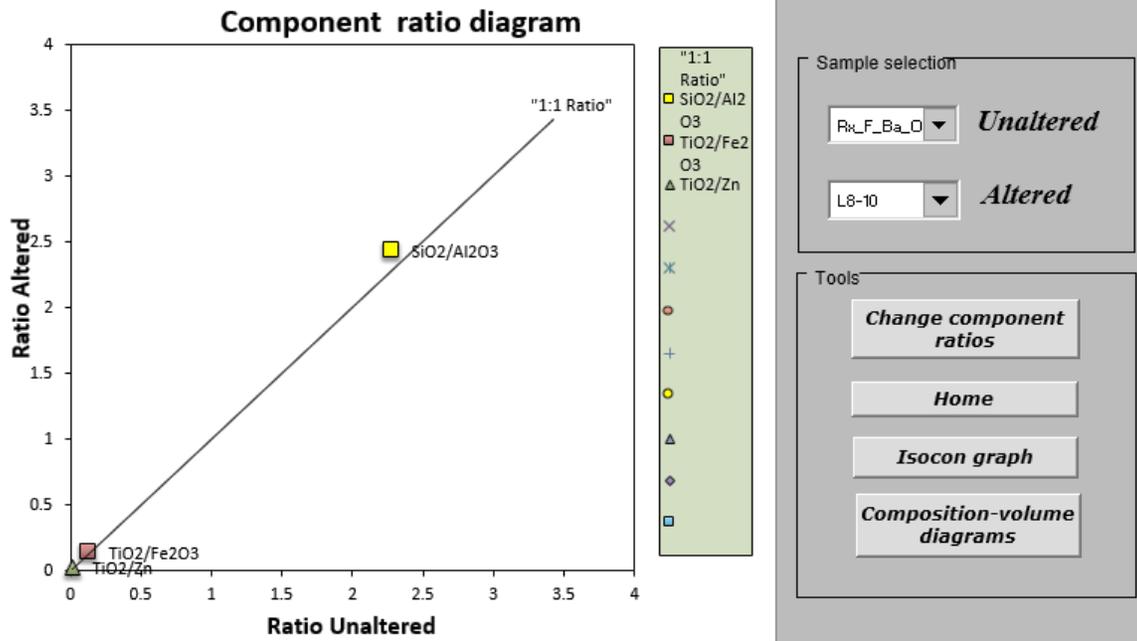


Figura 47. Diagramas para determinar elementos inmóviles durante el balance de masas con la hoja de cálculo EASYGRESGRANT (López-Moro, 2012). El hierro total viene expresado como Fe_2O_3 .

ANEXOS V

Tabla 24. Resultados del Balance de Masas de las muestras regionales del CGH.
 And_Ba_Aglu: andesita – basaltos y aglutinantes; An_Rio: Andesitas – Riolitas; Dep_Piro: depósitos piroclásticos. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca	
	Norte	Este																											
L5-2	2171025	663090	-13.49	0.45	0.07	1.83	0.11	-0.96	0.56	-1.04	0.27	-6.92	93.58	1096.42	-0.01	-2.01	13.87	27.48	20.79	42.51	-3.32	6.96	710.72						And_Ba_Aglu.
L5-3	2172078	663035	-12.31	0.58	-0.41	1.84	0.08	-0.87	0.27	-1.17	0.10	32.50	82.81	831.64	0.02	-1.22	5.43	15.78	11.31	27.08	-2.18	3.69	1353.16		-2.70	-4.82			And_Ba_Aglu.
L4-2	2171088	664055	-8.04	0.52	-0.91	2.03	0.09	-0.77	1.45	-0.63	-0.05	58.11	126.08	987.19	0.06	-2.02	24.66	18.74	28.06	21.90	-2.05	-2.94	440.11	4.74	-0.72				And_Ba_Aglu.
L4-4	2173015	664003	-16.18	0.47	-2.65	1.72	0.09	-0.92	0.59	-0.98	-0.14	45.53	81.08	1004.80	0.17	-0.93	-10.38	23.30	12.86	25.68	-1.17	-0.28	309.03		-1.39	-4.29			And_Ba_Aglu.
L4-5	2174052	664030	-16.16	0.51	-2.46	2.25	0.08	-1.11	0.82	-0.96	-0.12	42.10	96.44	812.19	0.15	-1.66	19.98	13.36	26.73	26.35	-1.44	1.69	410.35		-1.36	-4.70			And_Ba_Aglu.
L3-2	2171061	665016	-10.79	0.53	-0.73	1.86	0.09	-1.08	0.76	-1.01	-0.09	27.98	100.15	996.54	0.05	-1.27	12.18	14.84	5.88	19.85	0.96	24.25	507.57			-2.81			And_Ba_Aglu.
L3-4	2173082	665010	-12.40	0.54	-2.56	2.47	0.09	-0.72	0.84	-0.79	0.00	47.80	101.72	636.99	0.16	-3.33	30.01	30.39	13.59	29.76	-1.32	2.87	653.60						And_Ba_Aglu.
L2-4	2173086	666038	-13.19	0.59	-2.04	2.09	0.09	-0.19	0.72	-0.91	-0.08	47.06	109.46	992.07	0.13	-3.25	35.35	14.29	12.98	18.50	-1.54	1.67	465.79		-0.88				And_Ba_Aglu.
L1-3	2172008	667046	-13.57	0.58	-1.47	2.25	0.09		0.39	-1.10	0.08	33.26	52.71	784.34	0.09	-0.92	25.95	19.61	18.87	25.99	-2.38	1.46	634.17		-0.47	-4.73			And_Ba_Aglu.
L1-8	2177034	667028	-5.42	0.14	-1.54	0.62	0.05	-0.94	1.65	-0.52	-0.17	48.75	111.54		-0.02	-5.52	-33.64	40.22	-35.93	11.44	-3.27	-5.81	579.62		-1.34				And_Rio.
L1-11	2180038	667024	-16.59	0.00	-5.53	-0.52	0.05	-1.42	-1.46	-0.97	-0.02	47.77	-63.56	-218.90	0.02	-1.90	-40.02	18.78	-4.68	9.87	1.45	-0.79	539.07		-0.22				And_Rio.
L2-10	2179072	666004	-10.14	-0.17	-3.46	-1.65	0.02	-1.63	-1.41	-0.33	-0.14	59.15	-106.10	-336.10	0.05	-1.91	-60.14	28.69	-12.70	-13.31	1.28	-0.39	296.07		-2.25				And_Rio.
L2-11	2180018	666066	-12.75	0.08	-5.17	-0.01	0.05		-0.88	-0.49	-0.21	65.18	-14.43	-112.76	28.64	-0.80	-54.24	14.03	11.12	5.89	2.13	-0.83	803.49	0.23	1.57	4.16			And_Rio.
L3-11	2180070	665041	-22.78	-0.11	-6.65	-1.18	0.04	-1.46	-1.29	-0.77	0.21	49.13	-105.27	66.09	0.04	-0.61	-34.17	20.25	-12.02	-1.49	2.12	-0.52	914.32	-0.92	-1.67	4.40			And_Rio.
L3-10	2179031	665031	-19.67	0.05	-6.00	-1.35	0.03	-0.74	-1.30	-0.69	-0.20	49.15	-100.25	44.46	0.04	-1.28	-56.77	21.75	-9.57	-3.01	1.48	-1.85	721.65		0.12	4.20			And_Rio.
L1-10	2179017	667056	-12.26	-0.06	-4.22	-1.21	0.03		-1.13	-0.47	-0.16	49.95	-68.03	47.93	0.04	-1.28	-41.98	30.33	-5.43	-3.02	1.70	-1.23	694.33		-1.93				And_Rio.
L5-11	2180092	663003	-19.17	-0.12	-6.29	-1.39	0.03	-0.87	-1.26	-0.62	-0.16	50.12	-101.66	48.40	0.04	-1.96	-47.10	13.68	-6.19	-4.11	2.31	-3.27	654.32	0.04	-0.27	4.58			And_Rio.
L1-6	2175069	667055	8.43	0.04	-2.25	-0.20	0.00		-0.14	2.00	-0.09	37.12	-15.85		-0.04	0.83	-13.39	3.40	3.09	-2.53	3.66	8.60	1197.13		1.88	14.67	5.95		Dep_Piro.
L2-7	2176069	666013	1.53	0.23	-1.70	0.76	0.02		0.22	0.60	-0.05	126.11	23.58		-0.02	0.53	-12.76	0.48	3.17	19.94	0.61	-0.44	454.94	2.10	-1.44	9.21	6.79		Dep_Piro.
L4-6	2175074	664053	-10.87	0.22	-0.82	0.54	0.02		-0.05	-0.58	-0.01	93.02	59.22	463.58	-0.10	2.34	2.08	12.52	2.70	15.92	1.89	3.34	943.68		-0.45	11.19	3.74		Dep_Piro.
L4-8	2177056	664040	-2.19	0.17	-2.73	0.42	0.02		0.02	0.38	-0.09	125.24	2.62		-0.14	3.12	-13.44	-3.42	3.04	14.73	0.42	0.81	1135.21	1.88	-0.01	9.49	5.18		Dep_Piro.
L4-10	2179066	664044	-4.02	1.40	0.53	6.48	0.09		3.47	-0.52	0.04	80.06	374.84	324.84	-0.23	5.21	123.46		40.72	58.12	-2.98	0.17	1138.23		2.94	5.10			Dep_Piro.
L5-5	2174054	663071	-4.91	0.19	-1.78	0.52	0.02		0.16	0.00	-0.04	101.26	58.83	55.08	-0.17	3.97	-11.13	10.90	2.84	18.35	1.91	2.77	956.85		1.33	11.21	7.78		Dep_Piro.
L5-6	2175023	663034	-12.42	0.24	-0.29	0.92	0.01		-0.27	-0.33	-0.03	74.04	8.28		-0.08	1.85	9.75	2.61	2.70	21.53	3.51	4.04	1567.48	1.67	-1.94	14.13	3.17		Dep_Piro.
L5-9	2178017	663051	-1.11	0.22	-2.32	0.69	0.02		0.21	0.65	-0.03	149.89	33.28		-0.08	1.92	-2.55		3.28	7.83	4.76	3.95	2343.60	1.66	-1.13	14.09	11.26		Dep_Piro.
L5-10	2179044	663039	12.52	1.00	3.56	4.09	0.06		2.37	0.29	0.08	103.26	230.91		-0.11	2.45	61.58	36.77	3.58	47.44	-1.20	-2.41	3199.74	1.75		6.61	4.69		Dep_Piro.
L6-5	2174095	662003	-8.80	0.25	-5.50	0.87	0.03		0.17	0.41	-0.09	119.18	16.89		0.03	-0.70	-13.75		3.63	17.50	-1.73	2.25	392.79		0.85	6.97	3.59		Dep_Piro.
L6-9	2178042	662089	-18.73	1.00	-5.52	4.94	0.08		2.40	-0.59	-0.09	84.76	242.49	31.51	0.07	-1.71	73.47		4.12	39.77	-6.16	-0.68	354.55						Dep_Piro.
L7-4	2173060	661073	-8.77	0.21	-0.63	1.10	0.02		0.09	-0.11	0.02	100.96	31.50		-0.09	2.12	-4.51	14.00	2.90	10.50	1.46	3.21	1340.75	0.70	2.13	10.17	4.45		Dep_Piro.
L7-6	2175010	661053	-11.28	0.53	-3.58	2.28	0.03	1.02	0.61	-0.23	-0.08	98.51	67.95		-0.05	1.23	25.36		3.43	7.46	-1.31	-2.23	1426.15	1.48	-0.06	7.36	2.56		Dep_Piro.
L7-11	2180043	661096	-18.80	0.44	1.19	1.70	0.01		-0.02	-0.99	0.03	49.99	12.44		-0.10	2.30	17.66	26.74	2.56	4.45	1.45	-1.89	1165.25	1.52	-1.51	12.02	2.42		Dep_Piro.
L9-10	2179061	659062	-20.33	0.55	0.93	2.20	0.01		0.03	-1.05	-0.02	38.92	22.67		-0.02	0.57	43.48	35.69	2.65	1.86	-0.19	1.41	688.79	2.15	0.92	10.04			Dep_Piro.
L2-8	2177039	666056	12.98	0.30	1.81	1.14	0.03		0.54	1.05	-0.04	134.33	42.39		-0.06	1.30	-11.86	10.28	3.33	18.25	1.18	2.90	1312.87		0.52	9.60	4.83		Dep_Piro.
L6-8	2177093	662059	4.34	0.18	-7.27	-1.12	-0.01		-0.89	-1.16	-0.05	110.72	-131.89		0.00	-0.07	-24.58		2.98	-28.54	3.31	-1.77	705.02	0.51	2.08	13.35	4.98		Dep_Piro.
L6-10	2179060	662072	-14.48	0.60	-1.41	-0.84	-0.01		-1.27	0.59	-0.03	8.34	296.70		-0.01	0.17	-6.78		3.53	-55.83	5.76	2.75	83772.76			16.58			Dep_Piro.
L7-10	2179009	661074	-19.13	1.40	0.52	-0.48	-0.02	0.10	-1.33	-1.30	-0.06	-38.62	76.38		0.03	-0.79	64.57		3.14	-44.13	0.44	-6.63	37399.08	1.18		10.25	2.25		Dep_Piro.

Tabla 25. Resultados del Balance de Masas de las muestras locales del CGH.
 And_Ba_Aql: andesita – basaltos y aqlutinantes; An_Rio: Andesitas – Riolitas; Dep_Piro: depósitos piroclásticos. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	Norte	Este																										
LL17-25	2177209	661502	-14.50	-0.31	-9.37	-3.12	0.00	-3.79	-3.82	-0.09	-0.07	18.56	-110.29	-228.95	-2.29	0.49	-60.56	44.38	-12.40	0.01	0.08	-1.56	225.86	-1.23				Ba_Olv.
LL17-27	2177006	661404	16.65	1.02	-4.87	2.31	0.05		-1.39	0.17	-0.03	22.09	45.25		121.24	1.18	37.26	182.55	1.00	-0.02	0.14	-2.83	3464.74	0.40				Ba_Olv.
LL17-29	2177202	661403	-3.94	0.11	-3.66	-0.16	0.03	-4.03	-1.61	-0.06	0.09	14.12	-31.83		35.21	-1.67	-29.46	64.87	-11.61	0.00	0.10		324.72	0.25	-0.99			Ba_Olv.
LL17-30	2177402	661401	-9.57	-0.11	-7.32	-1.80	0.02	-3.92	-3.39	-0.04	0.16	18.85	-99.06		15.59	-0.88	-40.57	51.45	-29.34	0.00	0.09	-1.82	277.21	0.00				Ba_Olv.
LL17-31	2177507	661403	-8.20	-0.11	-5.77	-1.48	0.02	-4.66	-2.22	-0.11	-0.16	14.58	-55.19	-226.08	18.22	-1.83	-33.66	81.09	-18.46	0.00	0.09	-0.12	224.32		-1.36			Ba_Olv.
LL17-32	2177603	661409	13.08	0.72	-5.06	-0.45	0.05	-5.01	-3.38	0.46	0.15	48.14	-18.18		84.08	-0.61	-16.75	126.36	-38.35	-0.01	0.12	-0.98	3796.71	0.47				Ba_Olv.
LL18-24	2177706	661410	-0.02	0.27	-6.55	0.00	0.02	-5.74	-3.88	0.35	0.06	31.38	-43.55		47.57	-0.98	-33.86	60.26	-28.84	0.00	0.10	-3.88	6208.87	0.75				Ba_Olv.
LL18-25	2176910	661306	-2.54	0.12	-5.38	-0.85	0.03	-4.07	-1.92	-0.02	-0.04	18.23	-28.93	-155.95	39.59	-0.43	-18.59	126.06	-17.54	0.00	0.10	-2.18	754.81					Ba_Olv.
LL18-26	2177002	661304	-2.01	0.38	-6.66	1.53	0.02	-4.18	-2.81	0.19	0.05	26.56	9.33		55.54	-1.32	-2.44	140.17	-19.03	-0.01	0.11	-1.94	8206.31	1.73				Ba_Olv.
LL18-27	2177208	661306	-1.91	0.22	-5.78	1.22	0.02	-5.81	-2.20	-0.14	-0.16	8.90	-40.97	-140.49	50.46	-2.38	-22.75	124.04	-9.96	0.00	0.11	-3.72	440.05					Ba_Olv.
LL18-28	2177305	661302	-1.76	-0.19	-8.13	-2.39	0.02	-4.60	-3.70	0.23	-0.06	46.39	-74.65		27.88	-1.98	-63.21	32.35	-23.50	0.00	0.10	-2.10	632.49	-1.08				Ba_Olv.
LL18-30	2177503	661308	-5.09	0.08	-2.77	-0.01	0.05	-2.44	-0.82	-0.13	-0.19	10.42	-3.45	-202.26	35.07	-0.69	-25.83	141.08	-28.80	0.00	0.10	-1.03	52.17		-0.47			Ba_Olv.
LL18-31	2177607	661302	-13.97	-0.16	-9.82	-2.49	0.00	-5.66	-3.60	0.10	-0.09	22.71	-82.86		8.83	-1.19	-65.49	88.48	-20.35	0.00	0.09	-1.45	571.25	-0.11				Ba_Olv.
LL18-32	2177709	661306	-11.75	-0.13	-6.19	-1.61	0.02	-3.16	-2.88	-0.08	0.04	13.39	-79.46		12.90	-1.20	-49.62	55.27	-14.60	0.00	0.09	-3.62	524.36	-0.04				Ba_Olv.
LL18-33	2177806	661301	-1.68	0.11	-4.93	-0.74	0.03	-2.83	-1.79	-0.07	-0.09	14.66	-37.83		37.93	0.20	-24.09	130.84	-20.72	0.00	0.10	-1.89	557.74		-0.99			Ba_Olv.
LL18-34	2177905	661309	-9.57	0.09	-5.44	-0.30	0.03	-3.81	-2.72	-0.12	-0.14	15.97	-66.05		24.57	-1.67	-30.42	96.90	-23.65	0.00	0.10	-3.98	1194.26	0.03				Ba_Olv.
LL19-11	2175603	661205	21.20	-0.24	-4.61	-4.40	0.02		-5.96	3.23	-0.04	188.95	-39.41	572.93	321.94	19.02	-145.62	-172.42		0.00	16.01	14.84	-118.22		5.00	16.05		Ba_Olv.
LL19-19	2176404	661203	-10.52	-0.11	-5.98	-1.14	0.03	-2.42	-2.03	-0.17	-0.18	8.69	-52.61	-175.37	16.81	-0.52	-53.93	86.57	-14.26	0.00	0.09	-4.06	126.36	-0.57				Ba_Olv.
LL19-24	2176907	661204	-3.66	0.28	-1.64	1.82	0.03	-2.72	-1.93	0.09	-0.07	20.45	-3.14	-169.19	53.27	0.12	-4.88	108.00	-6.36	0.00	0.11	-2.60	1084.36		-0.77			Ba_Olv.
LL19-25	2177001	661208	-3.56	0.23	-4.00	0.82	0.05	-5.03	-1.90	-0.08	-0.02	17.41	-15.27		40.77	-0.92	-10.76	161.62	-14.54	0.00	0.11		674.33	0.27				Ba_Olv.
LL19-26	2177104	661202	-13.70	-0.12	-7.47	-1.29	0.04	-4.76	-3.78	-0.09	-0.08	18.56	-114.77	-245.29	4.44	-1.10	-64.67	23.63	9.58	0.00	0.08	-4.70		-0.67	-1.06			Ba_Olv.
LL19-27	2177202	661201	-5.80	0.02	-6.15	-0.95	0.04	-5.84	-2.11	-0.02	-0.19	13.37	-31.36	-263.51	34.20	0.78	-56.98	83.42	-8.82	0.00	0.10	-1.55	337.64		-0.48			Ba_Olv.
LL19-28	2177310	661204	15.11	0.56	-6.19	0.27	0.01	-3.86	-2.23	0.14	0.07	16.39	18.52		69.24	-2.19	-37.28	122.03	-21.19	-0.01	0.13	-3.14	4892.74		-0.41			Ba_Olv.
LL19-29	2177402	661210	-4.78	0.08	-3.22	-0.66	0.03	-3.85	-1.47	-0.11	-0.17	5.48	-29.77	-232.48	29.89	1.14	-38.26	109.95	-20.93	0.00	0.10	-4.68		-0.43	-0.57			Ba_Olv.
LL19-30	2177508	661209	-11.37	-0.11	-7.21	-2.26	0.02	-4.10	-3.38	-0.02	-0.01	20.08	-87.67		17.18	-0.78	-71.80	38.43	-26.35	0.00	0.09	-1.10	206.04	-1.07	-0.84			Ba_Olv.
LL19-31	2177610	661203	-9.58	-0.16	-6.98	-1.85	0.02	-5.15	-2.52	-0.06	-0.10	19.26	-65.41		11.78	-2.97	-41.77	68.03	-6.65	0.00	0.09	-4.00	29.29		-1.23			Ba_Olv.
LL19-32	2177702	661203	-9.13	-0.14	-6.47	-1.24	0.03	-4.18	-2.01	-0.17		7.94	-44.29	-192.73	16.70	-0.13	-50.61	74.99	-14.28	0.00	0.09	-2.17	7.09		-0.33			Ba_Olv.
LL19-33	2177807	661204	-7.08	-0.03	-5.15	-1.12	0.02	-3.74	-2.14	-0.14	-0.13	7.64	-55.96	-120.15	32.37	0.66	-42.34	15.79	-27.17	0.00	0.09	-2.82	500.76		-0.84			Ba_Olv.
LL19-34	2177901	661205	4.85	0.42	-3.86	1.92	0.03	-5.33	-2.04	-0.07	-0.09	14.33	-28.25		50.54	-2.30	15.00	152.88	0.74	-0.01	0.11		3107.80	2.63				Ba_Olv.
LL20-9	2175403	661104	27.93	0.02	-0.23	-3.05	0.02	-6.25	-4.22	3.02	-0.03	168.24	90.47		252.24	14.62	-123.44	-170.27		0.00	11.16	7.41	-256.48	0.29	2.81	9.82		Ba_Olv.
LL20-16	2176103	661108	-12.39	-0.18	-7.85	-1.63	0.02	-4.31	-2.47	-0.14	-0.16	11.96	-59.23	-193.35	16.67	-1.79	-50.95	79.35	-15.48	0.00	0.09	-3.50	191.91	-0.80	-0.36			Ba_Olv.
LL20-18	2176306	661106	-6.49	-0.05	-3.18	-0.57	0.04	-3.27	-1.11	-0.19	-0.20	2.33	-14.69	-258.50	1.30	-1.04	-29.05	106.49	-6.68	0.08	0.10	-4.78	-59.56	0.24	-0.51			Ba_Olv.
LL20-19	2176410	661105	-11.28	-0.11	-8.01	-1.44	0.02	-5.96	-2.67	-0.02	-0.19	14.93	-62.41	-248.24	20.56	-1.04	-55.84	91.38	-19.62	0.00	0.09	-4.01	347.24	0.43	-0.02			Ba_Olv.
LL20-20	2176509	661108	-9.49	-0.22	-9.13	-2.22	0.01	-5.68	-3.38	0.17	-0.11	34.45	-70.70	-155.06	16.75	-1.68	-65.45	67.09	-26.21	0.00	0.09	-2.06	265.70		-0.96			Ba_Olv.
LL20-21	2176605	661109	-11.41	-0.30	-6.58	-2.67	0.01	-2.40	-3.29	-0.05	-0.17	16.55	-95.32	-239.98	0.08	-1.51	-69.25	90.10	-14.35	0.00	0.08	-1.92	76.04	-1.23	-1.60			Ba_Olv.
LL20-22	2176705	661103	-11.34	-0.08	-5.97	-0.99	0.03	-3.46	-2.05	-0.16	-0.18	10.16	-46.81	-109.29	20.51	-0.46	-26.86	110.92	-6.29	0.00	0.09	-3.54	366.34	0.05	-0.86			Ba_Olv.
LL20-23	2176801	661107	-13.38	-0.21	-6.43	-1.68	0.02	-3.80	-2.41	-0.22	-0.11	5.33	-75.85	-210.28	7.16	-0.96	-41.15	86.77	-29.75	0.00	0.09	-4.68	-15.99		-0.62			Ba_Olv.
LL20-24	2176906	661107	-13.43	-0.22	-7.67	-1.91	0.01	-5.78	-3.18	-0.13	-0.23	12.00	-83.50		11.80	-1.53	-65.81	57.16	-17.57	0.00	0.09	-0.97	100.30		0.90			Ba_Olv.

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca			
	Norte	Este																													
LL20-25	2177008	661110	-5.71	0.13	-8.05	-1.49	0.01	-4.38	-3.51	0.10	-0.06	25.11	-87.60		54.21	0.95	-41.86	43.90	-17.26	0.00	0.10	-1.13	870.58							Ba_Olv.	
LL20-27	2177203	661109	-10.65	0.26	-4.86	0.84	0.03	-6.13	-2.72	-0.16	-0.04	5.64	-56.40	-212.65	45.12	1.17	17.90	139.52	-6.81	0.00	0.10	-2.07	3388.26	-0.33						Ba_Olv.	
LL20-28	2177305	661101	-12.28	-0.12	-6.77	-1.53	0.02	-3.74	-2.10	-0.13	-0.25	5.66	-44.65	-12.56	13.17	0.39	-41.75	54.95	4.33	0.00	0.09	-3.68	5400.24	-1.45	-0.22					Ba_Olv.	
LL20-29	2177406	661105	8.80	0.55	-1.71	1.14	0.04	-5.56	-0.15	0.06	-0.11	9.56	112.19	132.56	84.39	-0.42	46.65	192.96	-11.58	-0.01	0.12	-1.13	5578.64							Ba_Olv.	
LL20-32	2177703	661108	-7.26	-0.12	-6.50	-1.49	0.02	-2.86	-2.47	-0.08	-0.24	13.98	-52.85	-171.07	23.57	-1.61	-44.43	78.93	3.29	0.00	0.09	0.25	749.61		-0.99					Ba_Olv.	
LL20-33	2177804	661101	-7.12	-0.04	-4.22	-0.40	0.03	-3.54	-1.32	-0.22	-0.15	1.96	-32.30	-250.47	21.41	-1.00	-31.27	101.79	-8.32	0.00	0.10	-5.09	-54.91							Ba_Olv.	
LL20-34	2177905	661109	-12.50	-0.16	-7.41	-1.62	0.02	-5.26	-2.75	-0.11	-0.11	12.03	-74.89	-241.32	10.43	-1.72	-49.05	78.07	-14.10	0.00	0.09	-2.74	221.20	0.16	-0.55					Ba_Olv.	
LL20-35	2178002	661103	-11.97	0.01	-7.08	-0.53	0.04	-5.22	-2.38	-0.12	0.04	10.73	-47.61	207.63	31.12	0.77	-27.94	87.66	-20.79	0.00	0.09	-0.13	54.66	-0.51	-0.14					Ba_Olv.	
LL2-22	2176707	662908	1.27	0.00	1.54	1.54	0.03	0.06	3.07	-0.25	-0.10	-20.90	117.74	-65.65	0.00	-2.11	65.06	75.66	1.77	35.00	-7.61	-0.07	5.94	8.24	-1.82					Esc_Volc.	
LL3-28	2177309	662804	-11.59	-1.27	-6.04	-5.35	-0.07		-3.48	0.66	-0.22	43.95	-331.00		0.12	-1.97	-19.21		-42.03	5.96	-0.49		-1.70	-1.37	6.86					Esc_Volc.	
LL4-23	2176807	662702	8.35	-0.06	1.27	0.33	0.00	1.65	1.34	0.27	-0.06	22.37	104.57	95.65	0.00	-2.42	5.94	-0.51	-11.96	1.02	-2.30	-1.60			-0.56					Esc_Volc.	
LL4-28	2177301	662702	4.09	-0.10	3.65	1.07	0.02	-0.78	2.90	-0.35	-0.08	-24.67	106.67	-26.88	0.00	-1.56	66.30	73.68	-14.09	19.39	-4.06	-2.28	124.69	8.49	-2.41					Esc_Volc.	
LL5-29	2177404	662609	5.62	-0.07	4.06	1.36	0.02	1.78	2.85	-0.23	-0.06	-22.08	98.62	-157.52	0.00	-2.66	46.96	57.87	-8.26	43.40	-3.88	3.68	946.05	6.40	-0.44					Esc_Volc.	
LL6-17	2176207	662501	-7.28	-0.17	0.40	-0.62	0.00	-1.09	-0.91	-0.59	-0.10	-33.06	-90.09		0.00	-1.10	-9.85	17.30	-9.92	3.17	-2.67	-0.70	239.45			-3.92				Esc_Volc.	
LL6-33	2177804	662507	10.59	-0.05	2.55	0.46	0.01		1.11	0.32	-0.03	19.56	96.30	-78.18	0.00	-3.34	25.22	12.38	11.88	17.28	-1.86	4.21		1.70	-3.88					Esc_Volc.	
LL6-35	2178004	662508	6.52	-0.08	1.06	0.38	0.01		1.20	0.23	-0.07	22.24	98.64	227.08	0.00	-2.48	35.99	8.15	-8.51	13.47	-2.26	0.79	-7.10	3.02	-1.38					Esc_Volc.	
LL7-25	2177001	662405	11.64	-0.07	7.90	1.44	0.02	0.77	4.59	-0.13	-0.10	-18.09	219.16		0.00	-3.52	38.86	47.42	13.84	6.50	-7.60	-3.39			-3.73					Esc_Volc.	
LL8-19	2176407	662301	3.14	-0.07	2.84	1.37	0.03	-0.51	3.20	-0.21	-0.07	-22.48	121.65	-159.97	0.00	-2.07	58.60	66.34	23.22	26.54	-7.61	-4.12	218.65		-3.52						Esc_Volc.
LL8-26	2177102	662301	13.36	0.03	3.70	0.73	0.01	-0.69	1.33	0.42	-0.05	29.83	118.55	-172.76	0.00	-3.94	12.81	8.05	4.18	15.31	-1.92	1.46			-1.39					Esc_Volc.	
LL8-27	2177205	662310	12.08	-0.01	3.06	0.68	0.01	-0.47	1.06	0.31	-0.06	22.73	107.78	-190.93	0.00	-2.73	22.29	-14.58	0.02	8.24	-2.44	1.22			-2.67	-2.72				Esc_Volc.	
LL8-28	2177302	662302	2.78	-0.05	-0.52	0.83	0.01		0.78	0.31	-0.19	28.23	126.50	-57.99	0.00	-3.40	26.53	10.67	13.92	13.21	-0.91	-2.59	213.80		-0.05	-2.16					Esc_Volc.
LL10-19	2176401	662105	-2.24	-0.23	0.65	1.36	0.03		2.48	-0.38	-0.07	-24.31	96.96	389.90	0.00	-1.38	20.27	45.54	1.07	11.45	-2.01	-2.26	2922.45	-0.52	-3.37	-3.41					Esc_Volc.
LL12-30	2177509	661910	0.23	-0.23	0.08	0.96	0.04	0.75	3.12	-0.35	-0.14	-21.50	296.51	9262.56	0.00	-2.01	34.36	109.99	4.40	72.62	-1.61	44.40	6759.28	7.90	-2.98						Esc_Volc.
LL12-35	2178007	661903	-2.57	-0.17	-1.85	0.85	0.01	0.00	0.73	0.09	-0.24	23.61	122.84	-179.31	0.00	-3.73	-8.29		9.77	-1.24	-1.01	-4.90	244.02	-1.39	-1.00	-2.88					Esc_Volc.
LL14-30	2177504	661708	8.18	-0.22	-0.49	-0.02	0.00	1.01	0.68	0.15	-0.04	11.45	69.41		0.00	-3.48	1.98	-2.50	-10.29	11.03	-3.75	-0.96	519.28		-4.47						Esc_Volc.
LL15-30	2177501	661608	1.77	-0.05	0.88	1.28	0.03	-0.56	3.00	-0.27	-0.06	-26.52	107.17	-85.19	0.00	-1.65	34.25	47.45	6.57	13.55	-7.62	-0.73	24.92		-2.98						Esc_Volc.
LL9-5	2175006	662208	5.12	-0.13	0.58	0.57	0.01		1.25	0.29	-0.06	23.38	115.35	-109.59	0.00	-4.43	26.49		-33.69	12.70	-1.68	1.43	188.04								Esc_Volc.
LL9-19	2176404	662203	1.82	-0.05	1.82	1.51	0.03	-0.67	3.28	-0.36	-0.08	-24.17	118.91	-177.99	0.00	-2.42	52.91	63.57		22.40	-7.61	-4.19			-4.51						Esc_Volc.
LL3-15	2176001	662807	3.61	-0.74	-1.53	-1.46	-0.01		0.47	0.27	0.23	43.31	11.33	117.44	-0.02	-3.28	-46.44	42.72	2.84	-6.95	1.09	4.07	432.52		-2.80	-1.65	5.66				Lapi.
LL4-16	2176103	662705	12.68	-0.39	10.20	-4.37	-0.05		-3.01	0.49	-0.10	39.72	-121.81		0.00	-7.98	-12.17	159.57		-38.49	4.13	-3.50	68457.23	-1.30	-4.16	1.25	6.19				Lapi.
LL4-21	2176607	662707	-0.60	-0.67	0.40	-2.42	-0.03		-0.47	0.39	-0.15	19.91	-53.70		0.00	-4.40	-57.14	36.91	-16.90	-4.00	0.81	3.00	409.15	-2.15	-3.47	-0.08					Lapi.
LL6-14	2175906	662509	-12.38	-0.86	-3.67	-3.32	-0.04		-2.15	-0.15	-0.15	-4.72	-169.51	-315.89	0.00	-2.00	-44.72	-0.14		-18.40	0.69	2.53	132.15		-5.51	-0.82	4.00				Lapi.
LL7-22	2176710	662406	7.54	-0.03	0.01	0.71	0.01		1.01	0.51	-0.09	32.97	106.67	-103.21	0.00	-4.11	27.53	36.44	16.32	17.70	-2.00	2.26			-0.97						Lapi.
LL7-27	2177201	662402	1.55	-0.28	3.31	1.33	0.03	0.17	4.14	-0.37		-26.18	267.47	-67.92	0.00	-3.84	26.28	25.81	19.68	23.11	-7.60	-2.24	257.26		-1.17						Lapi.
LL8-3	2174802	662309	2.87	-0.07	3.12	1.19	0.03	0.81	2.35	-0.15	0.06	-23.60	114.50	58.27	0.00	-1.54	26.08	45.25	12.67	14.41	-2.80	4.92	9242.35	3.55	-2.97						Lapi.
LL8-15	2176010	662306	-7.60	0.09	-0.11	0.93	0.00	0.26	0.42	-0.62	-0.17	-33.32	67.84	66.15	0.00	-2.90	5.22	25.35	17.07	9.92	-2.16	0.17									Lapi.
LL8-21	2176603	662302	8.45	-0.06	3.87	1.10	0.02	-0.56	3.27	-0.16	-0.05	-11.27	198.19	-100.92	0.00	-2.60	24.49	13.32	5.87	24.41	-1.42	0.77	384.93		-2.80	-3.02					Lapi.
LL9-12	2175707	662206	-9.67	-0.83	-3.71	-3.04	-0.04		-2.25	0.25	-0.16	19.94	-236.62		0.00	-2.14	-49.00	-1.61		-29.28	1.87	-1.35			-3.79	1.00	5.49				Lapi.
LL9-17	2176208	662207	-12.03	0.05	-0.07	-0.23	-0.01	-1.32	-1.24	-1.24	-0.17	-53.39	-67.08		0.00	-3.09	-43.63	32.41	-11.82	8.80	-4.31	-3.71									

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca
	Norte	Este																										
LL12-10	2175501	661901	0.11	-0.40	-0.99	-1.43	-0.02		-0.60	0.23	-0.07	8.79	-50.90	-299.56	0.00	-0.43	-27.77	5.30		-1.20	-2.53	-0.22	308.08			-3.08		Lapi.
LL13-13	2175805	661810	16.12	-0.10	-0.87	-6.18	-0.05		-3.38	0.77	-0.11	-16.60	123.95		0.00	-6.43	-58.33				0.72	-0.11	75536.19		0.04	-0.33		Lapi.
LL13-15	2176001	661810	9.90	-0.85	-3.87	-4.25	-0.05		-3.34	-0.50	-0.22	-37.19	-182.10	566.11	0.00	-1.60	-87.34	2.12		116.14	0.21	-2.16	10752.86	2.15	-2.03	-0.74		Lapi.
LL14-19	2176404	661705	3.92	-0.83	3.51	-2.86	-0.06		-3.45	0.43	-0.19	-24.26	-173.49		0.00	-4.35	-71.61			-63.70	0.53	-0.06	63796.43		-2.59	-0.84		Lapi.
LL1-1	2174602	663005	-1.94	0.26	-1.18	0.65	0.01	0.17	0.03	0.26		95.98	-16.31		-0.01	-1.31	-19.35	0.88		6.98	2.93	-0.63	243.85	1.79	3.99	15.64		Pumic.
LL1-6	2175109	663006	1.05	0.31	1.99	1.21	0.02	0.75	0.21	-0.09	-0.06	98.03	32.25		-0.01	1.63	-10.21	32.40		12.16	1.76	1.49		1.56	2.11	12.10		Pumic.
LL1-7	2175207	663007	-3.56	0.20	0.27	0.48	0.01		-0.07	0.28	-0.04	88.86	-15.40		0.00	1.40	-3.92	32.02		6.84	1.99	0.47			-1.56	11.53	4.20	Pumic.
LL1-11	2175610	663002	-9.94	0.14	-2.23	0.19	0.00		-0.27	-0.16	-0.15	83.81	-18.70		0.00	0.33	-21.32	37.80		0.90	1.92	1.07	232.88	1.03	5.72	12.81		Pumic.
LL1-14	2175905	663008	-4.17	0.28	1.64	0.72	0.02		-0.06	-0.27	-0.07	86.12	11.47		-0.01	2.51	-9.27	24.20		12.56	4.33	-0.62		1.05		14.29	4.44	Pumic.
LL1-15	2176001	663009	7.55	0.09	-2.58	-0.24	0.00		-0.54	1.66	-0.12	179.90	-85.31		0.00	0.84	-19.81	18.53		-11.84	3.99	3.40			5.60	14.83	2.05	Pumic.
LL1-16	2176104	663005	-2.81	0.25	-0.45	0.75	0.02		0.03	0.16	-0.03	106.17	72.12		-0.01	3.76	6.48	24.30		19.40	2.05	1.58	448.87	1.15	-0.30	12.74	3.72	Pumic.
LL1-17	2176201	663006	4.52	0.46	2.73	1.99	0.04		0.56	0.31	0.00	103.44	31.73		0.00	-0.27	22.67	45.91		10.19	3.35	0.42	313.42	1.37	2.10	13.68	4.63	Pumic.
LL1-18	2176308	663002	4.68	0.54	4.13	1.99	0.04		0.56	-0.54	0.25	80.49	62.37		-0.02	1.56	26.44	43.98		16.98	1.99	2.25	636.71	1.18	-1.42	11.12	6.34	Pumic.
LL1-21	2176609	663001	1.52	0.14	-2.17	-0.07	0.00		-0.26	0.79	0.00	149.84	-68.25		0.00	1.06	-13.69	29.96		-0.60	5.61	3.47	534.95	0.95	1.53	15.80	4.95	Pumic.
LL1-22	2176706	663005	4.88	0.32	0.28	1.09	0.02		0.32	0.41	0.01	123.01	12.98		-0.01	0.32	0.62	30.42		22.18	0.35	3.40	380.35		-0.48	10.22	4.17	Pumic.
LL2-2	2174709	662907	0.43	0.18	0.16	0.53	0.01		-0.06	0.38	-0.09	113.28	-9.78		0.00	0.16	-4.84	30.82		7.47	2.57	2.13			2.46	13.42	3.98	Pumic.
LL2-7	2175203	662901	-17.71	0.16	-2.23	0.40	0.00		-0.37	-0.70	-0.03	49.81	-48.55		0.00	2.69	5.59	26.59		8.01	1.15	4.00	307.43		-1.34	12.20	3.84	Pumic.
LL2-10	2175503	662906	0.25	0.22	0.27	0.67	0.01	0.14	0.04	0.50	-0.08	108.48	-8.64		-0.01	1.57	-18.16	24.18		18.17	1.32	1.02		1.89	2.79	11.60	1.59	Pumic.
LL2-12	2175702	662902	-5.90	0.16	-0.25	0.40	0.01		-0.08	-0.09	-0.06	93.48	56.90		0.00	2.26	-13.21	22.47		12.95	3.06	2.36		0.51	1.96	14.25	1.53	Pumic.
LL2-13	2175805	662907	-3.78	0.20	0.31	0.53	0.01		-0.13	-0.28	-0.09	85.96	-2.78		0.00	2.59	-11.71	18.50		13.64	3.37	3.09	260.39		-0.68	13.97	3.75	Pumic.
LL2-15	2176002	662904	17.10	0.80	4.00	3.21	0.05	0.92	3.74	1.03	0.02	147.41	311.48		-0.03	-1.31	42.28	64.24		21.73	-0.10	-3.86	160.10	1.76	2.58	10.04		Pumic.
LL2-18	2176309	662902	-1.74	0.38	-1.64	1.70	0.03		0.73	0.36	-0.07	118.39	75.19		0.05	0.83	-3.16	28.92		21.29	-0.21	1.58	226.72	1.20	4.40	9.59		Pumic.
LL2-30	2177509	662906	13.50	0.51	3.21	1.93	0.03		0.86	0.61	0.02	138.21	66.14		-0.02	0.75	10.71	31.31		11.17	2.73	4.51	315.29	4.58	4.41	14.05		Pumic.
LL2-32	2177710	662908	-4.09	0.09	-2.29	0.15	0.00		-0.23	0.33	-0.15	120.60	-22.07		0.00	3.76	-16.01			7.48	3.39	1.20			0.69	14.54	1.80	Pumic.
LL3-1	2174603	662806	-4.37	0.20	-0.47	0.44	0.01	0.31	-0.03	-0.07	-0.02	81.99	-6.78		0.00	1.37	-19.05	22.36		12.05	0.38	3.52			-1.42	9.92	4.24	Pumic.
LL3-3	2174810	662803	1.11	0.27	1.37	0.95	0.01		0.11	0.12	-0.09	103.97	26.41		-0.01	1.24	-17.72	14.80		20.93	1.07	5.61	123.47		4.16	12.52		Pumic.
LL3-8	2175301	662809	-1.03	0.24	-0.99	0.70	0.01		0.09	0.39	-0.09	98.29	-5.67		-0.01	1.34	-2.62	24.65		12.42	2.00	2.57	290.76		1.09	12.32	5.34	Pumic.
LL3-9	2175406	662808	1.67	0.33	1.94	1.24	0.02	0.53	0.16	0.33	-0.13	83.30	-20.56		-0.01	-0.28	-0.49	35.58		16.23	2.03	-0.36	246.99	0.61	3.98	12.26		Pumic.
LL3-12	2175701	662807	-4.03	0.22	-0.34	0.85	0.02		-0.10	0.06	-0.08	92.56	44.18		-0.01	2.49	-0.92	16.39		19.24	1.60	3.50	75.03	1.75	2.95	13.26		Pumic.
LL3-13	2175808	662803	-0.25	0.21	-1.42	0.47	0.01		0.04	0.39	-0.01	113.10	7.70		0.00	2.11	-7.69	27.20		18.29	1.26	2.39	80.44		-1.18	11.24	8.53	Pumic.
LL4-8	2175306	662710	2.42	0.21	-1.04	0.52	0.02		0.07	0.56	-0.09	127.05	-5.05		0.00	1.74	2.15	6.56		13.60	3.00	0.63		0.66	-0.44	13.84	3.62	Pumic.
LL4-12	2175701	662701	-11.57	0.18	0.88	0.65	0.00		-0.20	-0.73	0.02	57.14	0.57		-0.01	-0.30	-1.01	25.77		1.30	0.02	0.43	410.74		-0.60	10.20	3.47	Pumic.
LL4-14	2175906	662706	-1.74	0.19	-1.54	0.53	0.01		-0.03	0.19		-2.19	46.54		0.00	1.49	-13.76	15.76		8.83	2.84	2.14	183.17		7.32	16.40		Pumic.
LL4-17	2176204	662706	7.32	0.28	-0.30	0.46	0.01		0.18	0.97	0.01	162.09	-14.73		0.00	2.13	3.50	21.39		-1.81	5.08	3.22			0.92	15.43	3.74	Pumic.
LL4-27	2177207	662704	-0.58	0.08	-2.94	-0.19	0.00		-0.32	0.77	-0.13	10.52	-51.60		0.00	2.52	-16.20	21.66		4.24	2.28	3.83	100.03	2.27	4.14	13.54	2.34	Pumic.
LL4-33	2177801	662704	6.92	0.13	-0.55	0.06	0.01		-0.18	0.79	-0.02	129.04	-41.69		0.00	1.67	-4.85	18.12		11.36	2.36	2.78		3.47	-1.79	12.33	9.48	Pumic.
LL5-3	2174802	662609	-11.85	0.21	-1.82	0.53	0.01		-0.23	0.02	-0.09	104.90	-2.33		0.00	1.69	-17.12	11.01		-5.19	3.60	-0.83	215.15	3.05	0.33	14.05	5.70	Pumic.
LL5-6	2175109	662605	-12.50	0.28	2.43	0.93	0.01		-0.33	-0.64	-0.04	58.87	-30.96		-0.01	1.62	-12.83	20.76		10.24	0.26	1.94		1.22	1.77	11.33		Pumic.
LL5-8	2175307	662603	13.55	0.54	5.22	2.36	0.04		0.54	0.53	0.03	119.39	14.73		-0.02	0.76	19.33	29.99		45.99	0.47	12.58	544.35		2.47	9.90	5.11	Pumic.
LL5-9	2175402	662603	7.30	0.36	1.81	1.53	0.04		0.44	0.52	-0.07	128.45	45.01		-0.01	0.17	6.78	30.70		19.75	-0.41	3.12	473.84		5.56	9.78		Pumic.
LL5-11	2175606	662603	-19.01	0.18	-3.74	0.35	0.00		-0.79	-0.39	-0.13	-0.10	-77.69	-87.21	0.00	1.89	0.63	26.90		-6.04	4.79	1.92	398.27		2.79	16.57	1.75	Pumic.
LL5-12	2175703	662609	-7.89	0.31	-2.68	1.27	0.02		0.44	0.11	-0.07	121.9																

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca	
	Norte	Este																											
LL5-15	2176010	662606	3.40	0.44	0.15	1.41	0.02		0.69	0.29	0.04	121.46	38.23		-0.01	1.40	28.33	37.41		18.99	0.44	3.82			1.97	0.26	10.17	3.61	Pumic.
LL5-16	2176101	662606	7.89	0.83	3.37	3.12	0.05		1.85	0.36	0.03	109.30	186.51		-0.03	2.89	60.15	42.34		31.14	0.89	0.72	498.56		0.35	9.38	3.35	Pumic.	
LL5-17	2176209	662608	-5.99	0.20	-2.06	0.40	0.01		-0.15	0.43	-0.15	107.98	-9.31		0.00	2.95	-9.82	27.15		2.26	1.04	3.24			3.96	12.38		Pumic.	
LL5-20	2176510	662607	-4.04	0.41	4.94	1.49	0.04		0.04	-0.89	0.13	51.17	1.42		-0.01	0.07	11.46	28.47		12.95	1.28	6.38	298.30		1.58	12.29		Pumic.	
LL5-24	2176906	662606	13.81	0.76	2.67	2.56	0.04	0.87	1.48	0.14	-0.02	80.49	120.95		-0.02	0.90	29.88	61.77		26.32	-0.83	-0.69	254.76		1.63	8.46	1.94	Pumic.	
LL5-35	2178004	662609	5.20	0.41	-1.47	1.44	0.03		0.72	0.72	-0.07	138.45	40.84		-0.01	1.73	12.21	25.87		16.47	0.37	0.94			3.94	11.88		Pumic.	
LL6-1	2174610	662510	-12.96	0.27	-1.08	1.03	0.01		-0.22	-0.50	-0.13	76.72	-5.78		-0.01	3.23	3.62	36.13		8.86	-0.40	6.08	319.68		0.57	9.94	2.55	Pumic.	
LL6-3	2174803	662502	-8.86	0.27	0.22	0.91	0.00		-0.22	-0.39	-0.13	73.00	8.62		-0.01	2.06	-3.01	26.71		1.00	1.05	7.79			1.73	12.79		Pumic.	
LL6-5	2175001	662506	-1.47	0.25	0.37	0.75	0.00		-0.10	0.04	-0.13	68.23	-26.13		-0.01	0.66	-13.61	27.26		3.37	0.76	3.43			2.63	11.42		Pumic.	
LL6-6	2175101	662510	-0.84	0.27	-0.49	0.77	0.01		0.19	-0.05	-0.06	91.14	33.45		-0.01	1.09	-4.83	16.28		4.25	0.53	3.21	312.81		0.44	10.27	3.75	Pumic.	
LL6-7	2175203	662504	-4.72	0.26	0.48	1.04	0.01		0.00	-0.38	-0.05	83.36	5.26		-0.01	0.03	0.09	26.96		-2.46	-0.19	3.73	87.15	2.14	1.12	10.75		Pumic.	
LL6-9	2175409	662506	-13.70	0.19	0.72	1.01	0.01		-0.38	-0.76	-0.04	60.15	-35.15		-0.01	0.32	4.43	19.59		-8.30	-0.94	-0.76	253.70	0.93	0.95	8.61	2.25	Pumic.	
LL6-10	2175505	662501	-4.89	0.18	-0.45	0.86	0.02		-0.13	-0.01	0.05	102.34	-6.32		-0.01	1.21	1.50	41.27		19.08	0.82	2.42	541.88	3.77	1.74	10.74	2.73	Pumic.	
LL6-15	2176003	662501	4.62	0.61	1.88	2.05	0.03		0.90	0.43	0.03	90.57	71.96		-0.02	2.09	35.15	30.53		20.51	1.24	0.06	316.19		1.07	9.92		Pumic.	
LL6-16	2176106	662503	-10.45	0.23	-2.04	0.49	0.01		-0.08	0.40	-0.06	95.49	-1.65		0.00	2.14	-14.39	18.91		10.25	4.42	2.81	432.25		-1.48	15.98	5.18	Pumic.	
LL6-24	2176902	662503	11.04	0.05	-0.94	-0.38	0.00	0.20	0.24	0.87	0.02	138.46	13.55		0.00	0.96	-11.58	8.02		-13.54	5.36	45.35			2.61	16.59	3.98	Pumic.	
LL6-25	2177004	662502	1.86	0.10	-2.10	-0.13	0.00		-0.17	1.16	0.01	151.56	-55.99		0.00	2.69	-12.52	15.04		-1.38	5.49	-1.30		2.86	-0.15	15.31	8.12	Pumic.	
LL6-28	2177301	662502	-5.04	0.21	-2.11	0.34	0.01		-0.13	0.12	-0.05	110.84	-7.11		0.00	2.79	-5.58	19.52		9.13	1.78	0.45		1.57	0.32	12.84	1.86	Pumic.	
LL7-1	2174602	662410	7.71	0.49	4.58	1.90	0.03		0.85	-0.55	0.01	79.24	121.92		-0.02	-1.35	12.80	40.85		15.70	2.10	2.16	462.84		0.45	12.71		Pumic.	
LL7-3	2174802	662406	2.36	0.13	0.14	0.36	0.01		-0.12	0.34	-0.11	112.63	0.57		0.00	1.62	-20.71	21.83		3.63	1.17	0.75	70.48		2.50	10.80	3.35	Pumic.	
LL7-5	2175002	662407	3.19	0.29	-1.03	0.95	0.01		0.06	0.32	-0.06	97.04	-2.13		-0.01	-1.34	-1.63	39.42		5.31	4.34	0.57	622.91	0.85	-1.09	14.02	3.38	Pumic.	
LL7-16	2176101	662409	-13.55	0.23	-2.93	0.71	0.01		-0.23	0.30	-0.09	91.04	-24.05		-0.01	2.74	-4.85	13.70		12.15	2.08	-0.68			-1.58	11.79	6.58	Pumic.	
LL7-18	2176303	662408	-6.39	0.92	1.13	3.98	0.05		1.50	-1.26	-0.02	63.65	191.68		0.00	0.46	54.02	45.57		33.01	-0.60	2.70	468.97		0.88	9.90		Pumic.	
LL7-29	2177406	662402	-6.61	0.16	-2.73	0.50	0.01		-0.06	0.23	-0.06	111.37	-9.92		0.00	3.95	-13.59	14.71		12.51	2.08	1.75	248.20	0.72	-0.18	12.06	5.39	Pumic.	
LL7-31	2177603	662408	0.41	0.16	-1.46	-0.11	0.01		-0.36	0.46	0.03	135.66	-65.11		0.00	3.92	-4.77			3.09	4.57	2.71	147.24	1.12	0.24	14.68	4.67	Pumic.	
LL7-32	2177701	662404	7.20	1.27	7.59	4.76	0.07		2.35	-0.76	0.28	70.46	239.31		0.00	-0.91	98.26	43.97		48.00	-1.71	0.98	1134.21		0.17	6.60		Pumic.	
LL7-33	2177803	662403	-40.87	0.15	-9.31	-0.06	-0.01		-0.40	-1.90	-0.09	0.00	-13.02	-41.39	-181.65	-8.07	7.21			-2.07	-6.18	-4.15	189.97		-1.40	5.29		Pumic.	
LL7-34	2177901	662404	-2.89	0.20	-1.33	0.08	0.00		-0.19	0.25	0.09	119.43	-54.19		0.00	2.10	-6.98	23.79		-4.28	3.76	6.54	93.64		0.09	15.24	5.63	Pumic.	
LL8-6	2175109	662307	4.02	0.23	0.17	0.75	0.01		0.13	0.53	-0.15	114.79	-1.11		-0.01	0.88		24.44		6.11	0.47	5.35	285.16		5.07	11.92		Pumic.	
LL8-10	2175504	662308	9.72	0.18	0.04	0.36	0.01		0.06	0.78	-0.06	136.99	1.67		0.00	2.49	-4.55	21.73		7.21	2.17	1.88			2.58	11.77		Pumic.	
LL8-11	2175610	662305	-9.41	0.30	0.74	0.86	0.02		-0.13	-0.38	-0.05	75.05	34.12		-0.01	1.27	4.79	20.28		11.65	3.59	2.63	178.94			14.92	3.58	Pumic.	
LL8-12	2175710	662301	8.90	0.34	3.80	1.24	0.02		0.47	0.86	-0.02	127.98	9.07		-0.01	2.32	-3.19	26.06		9.75	1.73	3.62	303.53	3.66	-0.50	11.28	6.25	Pumic.	
LL8-13	2175801	662304	-15.20	0.47	-0.18	1.81	0.02	-0.07	-0.10	-0.85	-0.11	43.12	-5.25		-0.02	1.54	14.98	42.49		23.29	3.64	0.51	249.76		-0.25	14.62	2.27	Pumic.	
LL8-14	2175907	662307	2.57	0.13	-0.99	0.26	0.01		-0.13	0.65	-0.09	119.07	-20.43		0.00	1.15	-13.27	19.99		6.36	2.42	0.89	344.81		-1.43	12.92	7.93	Pumic.	
LL8-20	2176504	662302	1.03	0.93	3.94	3.23	0.05		1.15	-0.43	0.08	60.25	71.74		-0.03	2.21	40.66	51.73		44.62	-0.66	0.07			1.64	9.20		Pumic.	
LL9-4	2174907	662201	4.65	0.20	-0.91	0.45	0.01		0.05	0.58	-0.11	128.89	2.75		0.00	1.61	-19.31			9.80	2.08	2.36			-0.41	13.69	4.34	Pumic.	
LL9-6	2175106	662203	-0.29	0.12	-1.87	0.33	0.01		-0.03	0.44	-0.08	123.33	11.14		0.00	2.37	-10.78			12.57	1.92	1.33	209.61	4.59	-0.90	12.21	4.06	Pumic.	
LL9-8	2175309	662202	8.62	0.28	0.19	1.13	0.03		0.46	0.52	-0.05	132.56	46.24		-0.01	0.32	1.08	14.47		14.30	3.65	3.42	221.22	1.37	5.25	14.79	3.07	Pumic.	
LL9-10	2175506	662201	5.17	-0.14	-1.93	-1.18	-0.01		-1.01	1.74	-0.08	52.99	-144.88		0.01	1.87				-21.22	10.08	5.17	180.45	1.76	2.37	20.54	14.06	Pumic.	
LL9-13	2175801	662208	7.13	0.21	-1.09	0.50	0.01		0.12	1.82	-0.12	152.69	-38.58		0.00	1.69	1.56	16.69		-4.00	4.26	2.22			2.77	14.20	5.30	Pumic.	
LL9-14	2175902	662206	-1.27	0.08	-1.61	-0.18	0.00		-0.32	1.63	-0.09	143.97	-58.90		0.00	2.10	-19.63	3.02		-8.95	5.03	2.41		0.75	2.86	15.58	4.29	Pumic.	
LL9-16	2176102	662201	1.12	0.17	-1.34	0.02	0.00		0.12	1.35	-0.03	147.60	-10.74		0.00	2.11	-16.07	1.84		-11									

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca			
	Norte	Este																													
LL9-21	2176606	662205	-2.45	1.21	1.45	3.87	0.04	0.20	1.95	-0.85	0.14	62.77	182.80		0.00	8.03	101.64	78.37	29.90	45.80	0.12	-1.31									Pumic.
LL9-27	2177201	662203	-4.88	1.15	3.60	-0.54	-0.02		-1.19	0.41	0.00	-5.98	170.25		0.00	4.46	32.35	13.40		-42.83	-2.24	-4.06	73854.47		3.05	9.28				Pumic.	
LL9-29	2177407	662204	2.99	0.60	1.39	2.01	0.04		0.87	0.23	-0.01	92.13	81.29		-0.02	1.45	3.99	30.09		27.75	0.15	3.73			0.13	8.23	3.48			Pumic.	
LL9-31	2177610	662205	-0.73	1.40	5.21	5.21	0.07		2.31	-0.88	0.03	57.29	263.74	141.59	0.00	3.53	80.25	45.19	40.31	51.89	-2.39	4.48			1.72	7.34				Pumic.	
LL9-32	2177701	662209	1.95	0.24	-0.36	0.94	0.02		0.08	0.85	-0.08	135.02	-13.93		-0.01	2.60	-3.52	28.41		16.06	4.26	-0.37	235.19	1.34	0.32	14.40	4.53			Pumic.	
LL9-33	2177803	662202	-2.92	0.16	-2.04	0.37	0.01		-0.09	0.27	-0.12	110.07	5.14		0.00	2.46	-13.27	8.26		5.18	2.01	3.68	160.37		2.82	12.83	2.39			Pumic.	
LL9-34	2177908	662204	-10.19	0.19	0.57	0.42	0.01		-0.22	-0.35	-0.04	84.67	55.51	-12.94	0.00	4.14	8.65	22.88		9.87	4.15	4.21			-1.07	15.21	2.86			Pumic.	
LL9-35	2178003	662205	7.81	1.28	4.74	5.40	0.07		2.73	-0.18	0.03	74.96	277.67		0.00	0.37	75.58	64.76	28.52	56.61	-1.77	-1.70		4.59	0.28	9.67				Pumic.	
LL10-2	2174707	662102	10.06	0.27	-0.37	0.99	0.02		0.41	1.05	-0.08	141.93	27.84		-0.01	1.89	-7.11	14.79		20.54	3.13	0.48		2.37	1.53	13.34				Pumic.	
LL10-3	2174803	662105	-3.50	0.17	-0.69	0.41	0.01		-0.07	0.09	-0.09	99.75	14.76		0.00	1.17	-11.72	12.82		17.50	1.68	2.53			2.34	13.47				Pumic.	
LL10-6	2175105	662110	-1.75	0.21	-0.17	0.42	0.01		-0.05	0.14	-0.04	106.86	0.54		0.00	0.72	-18.36	8.74		4.04	2.25	2.70			-0.23	12.15	3.68			Pumic.	
LL10-7	2175202	662102	4.99	0.26	2.91	1.07	0.02	0.09	0.15	0.55	-0.08	106.22	11.07		-0.01	1.00	6.36	34.97		15.89	-0.43	3.47			2.24	8.88				Pumic.	
LL10-8	2175308	662103	-1.53	0.11	-2.15	0.29	0.01		-0.10	0.49	-0.09	2.86	15.50	0.41	0.00	3.65	-11.89	15.61		6.79	1.97	4.46		0.98	0.84	11.59	4.65			Pumic.	
LL10-9	2175409	662106	-0.07	0.27	1.46	0.84	0.02		0.15	0.18	-0.10	100.17	9.98		-0.01	1.90	-8.26	26.35		17.14	1.81	4.15	102.66		1.00	12.85	1.68			Pumic.	
LL10-13	2175805	662105	-4.23	0.34	-0.83	0.86	0.01	0.90	-0.22	-0.44	-0.10	62.49	-40.24		-0.01	0.82	-4.31	31.62		4.80	0.41	-3.64	282.25	0.85	0.51	10.42	2.40			Pumic.	
LL10-18	2176304	662110	15.00	0.24	1.80	1.16	-0.01		-0.90	0.11	-0.05	104.88	32.96		-0.01	-2.26	-8.13			-33.19	2.34	0.53	56941.36	3.08	2.71	11.97				Pumic.	
LL10-24	2176902	662102	13.04	1.20	-12.88	-3.11	-0.04		-1.70	-3.01	-0.05	-76.41	-197.83		0.03	2.16	15.33				-11.41	-10.43	1386.18		1.98					Pumic.	
LL10-26	2177102	662108	22.94	1.39	-12.25	-2.56	-0.03		-1.62	-2.64	0.03	-68.88	-181.87		0.02	2.84	27.66				-7.53	20.20	7106.60		3.05					Pumic.	
LL10-31	2177601	662109	-8.21	0.18	3.71	-0.64	0.00		-0.87	1.70	-0.17	125.74	-23.57		0.01	-1.57	-13.98			-23.65	4.18	-2.73	68285.91	2.59	0.39	14.46	4.35				Pumic.
LL10-35	2178007	662109	5.43	0.74	2.55	2.80	0.04		1.31	0.19	-0.05	100.82	148.47		-0.02	2.66	24.58	26.73		35.91	-2.36	1.40			0.48	7.42				Pumic.	
LL11-2	2174704	662001	-0.65	0.23	-3.05	0.74	0.02		0.29	0.59		131.20	31.42		-0.01	1.26	-8.51	4.22		13.35	1.60	1.28			2.89	13.02	2.89			Pumic.	
LL11-5	2175007	662010	-1.05	0.21	-1.72	0.79	0.02	0.60	0.42	0.38	-0.08	117.91	77.41		-0.01	2.86	-4.92	26.52		16.55	0.80	3.75	224.71		5.59	10.47				Pumic.	
LL11-15	2176009	662003	-4.93	0.10	-2.60	-0.19	0.00		-0.31	0.65	-0.04	113.95	-58.45		0.00	2.41	-15.14	11.02		-4.30	4.98	0.85			0.89	15.46	6.68			Pumic.	
LL11-16	2176102	662003	0.20	0.21	-0.76	1.00	0.02	0.14	0.17	0.33	-0.09	118.21	50.82		-0.01	2.47	-14.85	21.82		14.35	1.01	-0.76	195.17	2.34	4.75	12.10					Pumic.
LL11-20	2176506	662008	-0.62	0.04	-13.91	-3.34	-0.04		-1.80	-3.02	-0.05	-74.04	-206.29		0.03	-0.81	-23.61				-9.78	-4.38	759.81		0.60					Pumic.	
LL11-27	2177208	662008	31.83	1.04	-13.45	-3.16	-0.03		-1.58	-3.03	0.03	-68.96	-194.71		0.03	9.04	-7.37				-9.09	-12.29	2390.96		0.30					Pumic.	
LL11-28	2177305	662003	13.61	0.46	-13.98	-3.33	-0.04		-1.75	-3.08	-0.03	-74.71	-208.44		0.03	3.24	-14.29				-11.41	-14.65	1674.80		3.58					Pumic.	
LL11-30	2177506	662009	2.68	0.34	-2.65	1.89	0.00		-0.97	-0.33	-0.11	108.58	35.36		-0.02	-2.24	7.86			-38.23	2.29	-3.13	49668.80		3.79	12.91				Pumic.	
LL11-31	2177607	662003	0.78	0.28	0.22	0.36	0.00		-0.20	0.74	-0.07	149.62	15.87		0.00	1.59	-9.16	16.40		-15.17	3.75	0.26	4106.48	2.08	2.86	14.76				Pumic.	
LL11-33	2177801	662004	-7.60	0.25	0.03	0.72	0.01		-0.19	0.01	-0.06	72.36	-45.15		-0.01	2.14	-5.45	34.95		1.25	1.08	2.28				11.14	3.45			Pumic.	
LL11-34	2177903	662009	1.05	0.19	-2.07	0.37	0.01		0.06	0.81	-0.10	131.69	-3.46		0.00	2.80	-15.16	9.24		9.57	2.96	2.15			3.00	14.51	5.15			Pumic.	
LL11-35	2178009	662006	-1.89	0.23	-2.04	0.56	0.01	0.70	0.03	0.57	-0.10	114.01	-12.20		0.00	2.86	-3.46	15.81		13.89	4.13	0.84			3.84	15.93	1.53			Pumic.	
LL12-1	2174605	661910	-0.03	0.19	0.35	0.46	0.01		-0.02	0.22	-0.11	111.14	13.85		-2.01	2.08	-18.97	10.06		12.40	2.41	1.08		0.78	1.52	13.26				Pumic.	
LL12-5	2175001	661909	10.65	0.22	-0.16	0.73	0.02		0.26	0.90	-0.06	138.61	3.89		-0.01	2.08	-10.05	9.64		19.93	1.35	1.58		1.19	1.62	10.15	3.17			Pumic.	
LL12-11	2175602	661909	-7.28	0.25	-4.47	0.83	0.02		0.36	0.55		139.66	46.73		-0.01	2.49	-9.14			6.96	1.43	1.71	132.18		3.19	11.54				Pumic.	
LL12-19	2176408	661902	-6.20	0.23	-1.27	0.88	0.00		-0.21	0.71	-0.12	109.42	-38.24		-0.01	2.69	-1.74	38.77		5.93	5.25	3.02	217.38	0.78	0.84	15.36	4.08			Pumic.	
LL12-20	2176506	661910	-17.69	0.27	-1.20	2.19	-0.01		-0.55	-0.37	-0.06	-8.71	-16.07		-0.02	2.75	16.98	44.89		-5.71	2.61	-1.33	5052.71	3.92	-1.20	12.12	2.75			Pumic.	
LL12-27	2177209	661906	-2.15	0.53	6.47	-0.96	-0.02	0.17	-0.98	-0.84	-0.03	26.20	-14.03		0.01	2.23	3.29	6.91		-38.76	3.39	2.40	49787.17		-0.49	13.51	1.78			Pumic.	
LL12-29	2177405	661906	-4.08	0.24	-2.01	-0.81	-0.01		-1.01	-0.20	-0.04	91.29	80.19		0.01	1.44	-0.63			-31.36	4.44	-0.68	53361.63		0.40	14.80	4.39			Pumic.	
LL12-34	2177907	661908	-1.39	0.18	-3.45	0.36	0.01		0.15	1.14	-0.09	159.71	3.64		0.00	0.66	-11.93			3.70	5.31	0.58		2.85	5.89	16.83	3.18			Pumic.	
LL13-14	2175907	661801	-14.92	0.34	-9.19	-1.41	-0.05		-1.85	-3.10																					

Muestra	Coordenadas		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	V	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	Roca	
	Norte	Este																											
LL13-29	2177402	661806	6.45	2.38	-12.85	-2.56	-0.01		-1.38	-3.01	-0.09	-68.82	-183.98		0.02	1.35	44.61					-8.85	-8.52	2685.71	5.38				Pumic.
LL14-23	2176809	661710	-1.07	0.63	9.32	2.06	0.01		-0.50	-0.50	-0.12	78.80	-2.08		-0.02	0.58	21.55	51.83		0.06	-0.76	-1.14	36109.68	2.35	1.74	9.90			Pumic.
LL14-25	2177003	661704	36.79	1.92	-11.89	-2.83	0.00		-1.44	-2.75	0.11	-62.82	-182.70		0.02	1.11	29.27				-7.90	-5.92	3368.81	0.47					Pumic.
LL14-26	2177103	661705	17.86	0.72	-13.32	-3.18	-0.03		-1.60	-3.04	-0.16	-74.05	-190.10		0.03	3.75	-21.85				-8.37	-14.94	1708.07	5.02					Pumic.
LL15-1	2174601	661608	0.60	0.54	-0.04	2.31	0.04		1.25	-0.25	0.04	95.85	125.98		-0.02	-0.33	33.03	14.00		36.43	0.71	7.55	781.45	-0.50	9.90	5.47			Pumic.
LL15-4	2174902	661607	-2.99	0.28	1.05	1.11	0.02		0.21	-0.10	0.12	96.79	12.82		-0.01	2.68	5.82	29.00		15.56	0.98	2.02	260.69		10.77	6.03			Pumic.
LL15-5	2175009	661603	-6.07	0.36	0.10	1.46	0.03		0.08	-0.24		132.20	70.73		-0.01	2.38	-9.54	42.21		12.73	1.91	1.46	226.92	2.07	6.95	15.05			Pumic.
LL15-7	2175203	661609	4.95	0.25	0.72	1.11	0.02		0.17	0.28	-0.09	107.40	25.31		-0.01	2.55	-10.41	38.58		11.43	2.24	2.41		4.56	12.46	2.21			Pumic.
LL15-8	2175306	661601	-8.24	0.28	1.52	0.77	0.02		-0.16	-0.65	-0.09	77.85	32.47		-0.01	2.23	-14.68	20.99		10.46	0.40	3.82		3.06	11.65				Pumic.
LL15-9	2175409	661601	3.28	1.07	0.73	4.25	0.06		2.37	-0.14	0.03	91.03	251.58	63.26	0.00	2.39	60.99	21.59		47.35	-2.63	-3.01	193.29	-0.06	5.78				Pumic.
LL15-10	2175510	661606	-9.10	0.32	1.09	1.33	0.03		-0.06	-0.44	0.13	78.85	-2.83		-0.01	2.66	21.77	28.88		26.84	1.99	2.14	162.74	0.57	0.17	11.65	3.59		Pumic.
LL15-27	2177209	661604	31.98	2.18	-5.56	0.56	0.00		-0.31	-1.46	0.00	33.02	76.98		-0.01	0.06	83.37		23.39	-10.48	-7.17	0.90	13320.06		3.72				Pumic.
LL15-29	2177408	661610	-9.96	0.61	-13.59	-2.99	-0.03		-1.59	-3.05	-0.10	-76.56	-191.48		0.03	-0.35	-17.06				-11.39		746.69	-0.04	1.33				Pumic.
LL16-1	2174601	661502	-3.30	0.15	-1.34	0.59	0.01		0.08	0.31	-0.09	115.38	1.49		-0.01	1.79	-16.59	16.28		5.19	3.11	0.07		1.14	3.72	14.45			Pumic.
LL16-2	2174709	661507	2.16	0.26	0.24	0.61	0.01		0.11	0.29	-0.03	111.50	-1.67		-0.01	2.24	-11.88	1.22		11.66	1.11	-0.01		2.09	-1.01	10.84	1.83		Pumic.
LL16-4	2174910	661502	7.18	0.24	1.64	0.89	0.02	0.35	0.33	0.50	-0.06	113.50	19.37		-0.01	2.19	-6.27	34.07		5.55	1.74	4.28		2.14	12.71				Pumic.
LL16-5	2175003	661509	-4.36	0.36	0.80	0.88	0.02		-0.07	-0.41	-0.02	70.98	-2.56		-0.01	-0.21	2.50	11.19		25.93	-0.30	1.37	511.21	0.62	0.49	8.31	4.73		Pumic.
LL16-6	2175104	661502	1.40	0.25	0.90	0.75	0.02		0.01	0.21	-0.08	105.62	-3.89		-0.01	3.12	-18.53	10.71		12.17	2.27	0.78		1.45	12.58	2.35			Pumic.
LL16-8	2175304	661507	-4.38	0.47	0.79	1.49	0.02	0.13	0.60	-0.28	-0.01	87.07	55.43		-0.01	1.95	37.41	44.59		16.37	1.57	2.45		0.22	11.40	2.48			Pumic.
LL16-9	2175407	661504	2.98	0.92	1.10	3.32	0.04	0.76	1.80	0.05	0.02	95.37	154.08		-0.03	1.49	70.74	13.33	25.91	39.29	-1.13	3.47	113.28	2.19	9.27				Pumic.
LL16-13	2175803	661503	4.54	0.35	4.51	3.68	0.00		-0.96	0.34	-0.05	65.63	174.32		-0.03	-3.16	61.56	29.00		-35.89	-2.96	9.37	88855.54	17.59	-0.49	7.14			Pumic.
LL16-15	2176007	661504	23.04	0.45	-13.12	-3.13	-0.03	0.99	-1.67	-2.99	-0.06	-75.69	-199.31		0.03	1.51	-24.26				-9.46	-8.55	1618.41	3.14					Pumic.
LL17-1	2174603	661402	-9.08	0.27	-1.03	0.94	0.01		-0.07	-0.25	-0.01	99.98	-3.83		-0.01	3.70	-0.65	23.38		9.43	2.03	9.01	72.64	2.18	2.30	11.95	3.47		Pumic.
LL17-2	2174708	661409	3.41	0.33	-0.65	1.19	0.04		0.32	0.56	-0.01	119.13	16.95		-0.01	2.70	-7.98	30.04		28.84	4.22	1.69	595.16	5.07	0.44	14.26	3.95		Pumic.
LL17-3	2174804	661410	7.52	0.24	-0.22	0.83	0.01		0.10	0.58	-0.05	121.03	3.57		-0.01	0.35	-6.62	22.13		4.09	-0.43	1.49	144.99	0.71	3.67	9.05			Pumic.
LL17-4	2174903	661401	-2.58	0.23	1.93	0.91	0.02	0.29	0.00	0.07	-0.02	96.59	-18.93		-0.01	2.31	7.57	16.89		10.37	1.64	0.62	121.78	0.93	3.13	11.82	2.20		Pumic.
LL17-6	2175108	661401	1.09	0.70	4.09	3.19	0.05	0.20	1.91	-0.38	0.03	68.10	139.71		0.00	-2.17	39.29	43.72		15.02	-0.76	1.59	287.97	2.09	-1.16	8.93			Pumic.
LL17-7	2175201	661408	-5.15	0.35	2.25	1.18	0.02		0.15	-0.65	0.03	68.31	24.06		-0.01	1.62	14.32	28.88		9.60	1.57	0.54	78.76	0.83	12.72				Pumic.
LL17-9	2175409	661409	4.55	1.13	3.46	4.06	0.05	0.18	1.99	-0.31	0.07	72.41	177.61		0.00	2.25	64.06	51.36		43.70	-0.15	0.21	114.40		9.41	2.10			Pumic.
LL17-10	2175506	661404	8.59	0.27	-1.18	0.41	0.01		-0.05	0.97	-0.05	152.99	-16.78		0.00	0.98	-1.43	13.60		-0.97	2.32	5.62	3019.70	1.78	12.87	8.91			Pumic.
LL17-13	2175810	661410	18.89	0.60	-12.97	-3.09	-0.04		-1.69	-2.85	0.05	-73.59	-202.18		0.03	2.26	-8.43				-9.66	-14.41	1403.21	-1.04					Pumic.
LL17-14	2175901	661406	46.01	1.35	-6.99	-0.90	-0.01		-0.66	-1.39	0.04	-7.19	-92.66		0.01	1.35	3.27			-35.25	-7.58	-8.88	1212.58	4.46					Pumic.
LL17-20	2176502	661406	16.45	1.77	-5.92	-0.44	-0.01		-0.88	-1.45	0.11	20.03	37.68		0.00	1.15	83.12	15.83		-29.18	-6.19	-0.84	10901.06	0.82					Pumic.
LL17-34	2177904	661404	6.85	0.22	-0.46	-1.10	-0.01	0.39	-0.79	0.57	0.01	76.99	171.77		0.01	-0.49	-7.78	15.50		-35.97	4.50	52.95	53589.85	4.63	2.33	14.29			Pumic.
LL17-35	2178006	661408	26.30	0.37	-5.30	-0.87	-0.02		-1.04	-0.97	-0.09	54.26	-66.17		0.01	1.34	-12.48	5.56		-35.57	-2.56	-1.60	15564.22	11.54	4.54	7.98	0.84		Pumic.
LL18-1	2174610	661302	4.64	0.79	1.35	2.94	0.04		1.56	0.17	0.01	101.59	129.41		-0.03	1.28	54.94	44.59		29.84	0.11	1.54	1272.71	1.62	9.76	3.71			Pumic.
LL18-4	2174906	661301	-19.58	0.22	4.61	1.03	0.00		-0.48	-1.42	0.03	20.64	-45.86		-0.01	1.41	18.66	17.95		-17.95	0.79	-1.04	282.21	2.22	-0.62	11.73	0.64		Pumic.
LL18-6	2175101	661309	-14.68	0.24	-0.39	0.96	0.03		-0.18	-0.70	0.04	70.04	7.22		-0.01	0.38	2.04	26.09		9.94	-0.93	4.60	326.45	2.78	1.92	10.55			Pumic.
LL18-7	2175202	661303	-2.06	1.10	3.81	4.41	0.05		1.92	-0.51	-0.09	71.42	185.06		0.00	1.10	68.48	42.46	26.89	35.58	-0.99	2.63	284.01	4.22	10.14				Pumic.
LL18-8	2175305	661308	4.61	0.45	1.27	1.56	0.03		0.51	0.40	-0.02	116.00	24.63		-0.01	0.68	2.51	24.58		15.65	-1.46	3.98	234.29	1.17	8.93	1.50			Pumic.
LL18-10	2175506	661303	15.27	0.93	4.32	-0.26	-0.01		-1.07	1.33	-0.07	-1.08	351.56		0.00	0.65	27.15				-43.37	3.52	4.42	89585.09	4.50	13.43			

ANEXOS VI

Tabla 26. Resultados de la correlación de Person "r" de la unidad de basaltos de olivino. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	K2O	P2O5	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	
SiO2	1.00																								
TiO2	0.18	1.00																							
Al2O3	0.84	0.02	1.00																						
Fe2O3	-0.09	0.75	0.04	1.00																					
MnO	0.12	-0.10	0.33	0.44	1.00																				
MgO	0.88	0.14	0.61	-0.25	0.02	1.00																			
CaO	-0.19	0.70	0.01	0.98	0.35	-0.39	1.00																		
K2O	0.69	-0.53	0.66	-0.66	0.13	0.66	-0.71	1.00																	
P2O5	0.33	0.53	0.35	0.12	-0.34	0.24	0.17	0.08	1.00																
Rb	0.67	-0.56	0.64	-0.71	0.05	0.69	-0.75	0.98	0.02	1.00															
Sr	0.57	0.48	0.50	0.02	-0.49	0.57	0.04	0.14	0.63	0.23	1.00														
Ba	0.47	-0.18	0.06	-0.39	0.14	0.71	-0.58	0.50	-0.35	0.52	-0.06	1.00													
Zr	0.78	-0.41	0.68	-0.56	0.20	0.76	-0.65	0.98	0.08	0.95	0.16	0.62	1.00												
Nb	0.66	-0.50	0.48	-0.72	0.02	0.78	-0.82	0.92	-0.08	0.95	0.17	0.75	0.94	1.00											
Cr	-0.20	0.52	0.07	0.93	0.46	-0.48	0.96	-0.62	0.03	-0.67	-0.10	-0.61	-0.58	-0.78	1.00										
Cu	-0.04	-0.19	0.13	0.30	0.93	-0.11	0.21	0.13	-0.30	0.01	-0.69	0.15	0.19	0.01	0.33	1.00									
Zn	0.21	-0.66	0.00	-0.92	-0.42	0.22	-0.91	0.65	-0.17	0.66	-0.09	0.43	0.58	0.68	-0.81	-0.27	1.00								
Th	0.70	-0.54	0.72	-0.59	0.22	0.62	-0.63	0.99	0.03	0.97	0.12	0.46	0.97	0.89	-0.52	0.20	0.60	1.00							
Pb	0.60	-0.50	0.60	-0.63	0.16	0.65	-0.69	0.96	0.19	0.93	0.13	0.47	0.94	0.89	-0.64	0.20	0.53	0.93	1.00						
S	0.41	0.36	0.53	0.08	-0.48	0.20	0.19	0.06	0.66	0.12	0.86	-0.47	0.02	-0.06	0.13	-0.66	-0.07	0.08	0.00	1.00					
As	-0.07	-0.03	0.40	0.31	0.23	-0.14	0.40	-0.11	0.05	-0.02	0.30	-0.54	-0.19	-0.23	0.43	0.00	-0.52	-0.03	-0.06	0.43	1.00				
Mo	0.65	-0.31	0.79	-0.27	0.44	0.57	-0.32	0.86	0.29	0.79	0.12	0.25	0.86	0.67	-0.25	0.43	0.21	0.87	0.90	0.09	0.14	1.00			
Bi	0.61	-0.61	0.71	-0.55	0.28	0.47	-0.56	0.95	0.00	0.91	0.00	0.32	0.91	0.79	-0.41	0.28	0.58	0.98	0.88	0.06	0.02	0.87	1.00		
U	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	

Tabla 27. Resultados de la correlación de Person "r" de la unidad de andesitas – basaltos. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	K2O	P2O5	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	
SiO2	1.00																								
TiO2	0.48	1.00																							
Al2O3	-0.34	-0.60	1.00																						
Fe2O3	-0.34	0.26	0.22	1.00																					
MnO	-0.36	-0.22	0.67	0.69	1.00																				
MgO	-0.06	-0.28	0.03	-0.23	-0.22	1.00																			
CaO	-0.28	-0.56	0.90	0.15	0.77	-0.18	1.00																		
K2O	-0.49	-0.64	0.89	0.34	0.66	-0.15	0.82	1.00																	
P2O5	0.38	0.95	-0.52	0.21	-0.22	-0.48	-0.46	-0.52	1.00																
Rb	-0.52	-0.75	0.57	-0.14	0.47	0.32	0.66	0.42	-0.75	1.00															
Sr	-0.19	0.51	-0.10	0.89	0.32	-0.23	-0.24	0.07	0.48	-0.51	1.00														
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00													
Zr	0.33	0.35	-0.54	-0.17	-0.31	0.58	-0.56	-0.78	0.10	0.00	-0.08	0.00	1.00												
Nb	-0.11	-0.29	0.38	-0.29	0.29	0.22	0.59	0.17	-0.29	0.67	-0.60	0.00	0.02	1.00											
Cr	-0.08	0.29	0.33	0.07	0.13	-0.21	0.26	0.09	0.41	0.04	0.04	0.00	-0.13	0.33	1.00										
Cu	-0.56	-0.52	0.45	0.23	0.70	-0.25	0.66	0.45	-0.46	0.77	-0.16	0.00	-0.22	0.42	0.03	1.00									
Zn	-0.60	-0.24	0.62	0.80	0.90	-0.07	0.62	0.67	-0.25	0.41	0.46	0.00	-0.32	0.22	0.16	0.62	1.00								
Th	-0.76	-0.79	0.43	0.19	0.28	0.15	0.31	0.66	-0.72	0.47	0.06	0.00	-0.43	-0.16	-0.38	0.43	0.43	1.00							
Pb	-0.44	0.25	-0.07	0.86	0.28	-0.09	-0.24	0.17	0.21	-0.35	0.93	0.00	-0.12	-0.59	-0.11	-0.05	0.54	0.35	1.00						
S	0.09	0.57	-0.44	0.58	-0.09	-0.09	-0.62	-0.29	0.50	-0.68	0.85	0.00	0.21	-0.86	-0.20	-0.43	0.00	-0.03	0.77	1.00					
As	-0.50	-0.66	0.27	-0.20	0.06	0.66	0.23	0.33	-0.69	0.60	-0.32	0.00	-0.03	0.40	-0.36	0.14	0.17	0.60	-0.09	-0.37	1.00				
Mo	0.73	0.10	-0.41	-0.64	-0.54	0.45	-0.38	-0.64	-0.09	-0.07	-0.56	0.00	0.70	0.11	-0.27	-0.37	-0.67	-0.51	-0.61	-0.17	-0.06	1.00			
Bi	-0.69	-0.79	0.37	0.15	0.21	0.18	0.24	0.60	-0.74	0.42	0.04	0.00	-0.39	-0.22	-0.47	0.37	0.35	0.99	0.34	0.00	0.59	-0.42	1.00		
U	-0.60	-0.80	0.62	-0.07	0.33	-0.10	0.66	0.81	-0.62	0.55	-0.28	0.00	-0.76	0.29	-0.13	0.47	0.35	0.75	-0.09	-0.51	0.61	-0.54	0.71	1.00	

Tabla 28. Resultados de la correlación de Person "r" de la unidad de depósitos piroclásticos. El hierro total viene expresado como Fe₂O₃.

	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	K2O	P2O5	Rb	Sr	Ba	Zr	Nb	Cr	Cu	Zn	Th	Pb	S	As	Mo	Bi	U	
SiO2	1.00																								
TiO2	0.33	1.00																							
Al2O3	0.53	0.04	1.00																						
Fe2O3	0.00	0.44	-0.50	1.00																					
MnO	0.06	-0.52	0.46	-0.12	1.00																				
MgO	0.07	0.56	-0.06	0.43	0.02	1.00																			
CaO	0.56	-0.21	-0.13	0.22	-0.05	-0.23	1.00																		
K2O	0.51	-0.19	-0.29	0.35	-0.02	-0.10	0.94	1.00																	
P2O5	0.10	-0.01	0.68	-0.07	0.70	0.28	-0.41	-0.36	1.00																
Rb	0.19	0.35	-0.64	0.37	-0.77	0.12	0.52	0.60	-0.76	1.00															
Sr	0.58	-0.31	0.10	-0.01	0.04	-0.61	0.85	0.78	-0.25	0.28	1.00														
Ba	0.13	-0.67	0.54	-0.84	0.44	-0.41	0.13	-0.05	0.13	-0.45	0.23	1.00													
Zr	-0.53	-0.04	-1.00	0.49	-0.46	0.06	0.13	0.29	-0.68	0.64	-0.10	-0.54	1.00												
Nb	-0.28	0.10	0.16	-0.59	-0.31	0.14	-0.46	-0.63	-0.15	-0.11	-0.57	0.40	-0.16	1.00											
Cr	-0.07	-0.37	-0.14	0.20	0.63	0.18	-0.01	0.26	0.41	-0.21	0.02	-0.09	0.14	-0.62	1.00										
Cu	0.02	-0.22	-0.06	0.31	0.07	0.10	0.52	0.45	0.08	0.16	0.29	0.05	0.06	-0.19	-0.06	1.00									
Zn	-0.31	-0.49	0.29	-0.05	0.78	-0.05	-0.33	-0.23	0.80	-0.75	-0.13	0.17	-0.29	-0.33	0.64	0.18	1.00								
Th	0.11	0.13	-0.28	-0.06	-0.38	-0.36	0.17	0.09	-0.73	0.33	0.21	-0.03	0.28	0.11	-0.36	-0.58	-0.70	1.00							
Pb	0.19	0.03	0.38	-0.27	0.22	-0.35	-0.17	-0.32	-0.03	-0.43	0.05	0.26	-0.38	0.13	-0.23	-0.65	-0.15	0.67	1.00						
S	0.16	0.50	0.53	-0.11	-0.07	0.09	-0.56	-0.52	0.59	-0.30	-0.24	-0.24	-0.53	0.02	-0.07	-0.31	0.24	-0.34	0.04	1.00					
As	0.72	-0.01	0.18	-0.01	-0.11	0.04	0.83	0.76	-0.15	0.48	0.66	0.25	-0.18	-0.18	-0.11	0.56	-0.32	-0.14	-0.37	-0.23	1.00				
Mo	0.25	-0.25	0.04	0.31	0.69	0.15	0.34	0.37	0.14	-0.26	0.19	0.11	-0.04	-0.45	0.49	0.01	0.20	0.16	0.37	-0.51	0.05	1.00			
Bi	0.56	-0.35	0.25	0.15	0.64	-0.14	0.60	0.68	0.32	-0.12	0.68	0.18	-0.25	-0.78	0.64	0.22	0.38	-0.18	0.01	-0.16	0.47	0.65	1.00		
U	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	

