



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

GEOFÍSICA DE LA TIERRA SÓLIDA

**SECUENCIA DE EVENTOS ERUPTIVOS RECIENTES EN EL SECTOR ORIENTAL
DEL CAMPO VOLCÁNICO SIERRA CHICHINAUTZIN, CENTRO DE MÉXICO:
DISTRIBUCIÓN, EDAD Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAVAS Y TEFRAS**

TESIS

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

PRESENTA:

NÉSTOR LÓPEZ VALDÉS

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARIE-NOËLLE GUILBAUD

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

AGOSTO 2019



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



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

CERTIFICACIÓN DE
EXAMEN

DRA. POOJA KSHIRSAGAR, secretario del jurado
que examinó a NÉSTOR LÓPEZ VALDÉS
para optar por el grado de MAESTRO
en CIENCIAS DE LA TIERRA
hace constar que obtuvo la calificación de APROBADO

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 30 de agosto de 2019.

EL SECRETARIO DEL JURADO



DRA. POOJA KSHIRSAGAR

No. 4087072219073

Agradecimientos

Se agradece al Proyecto UNAM-PAPIIT con número de registro IN113517 y nombre “Evaluar los peligros del volcanismo monogenético y sus causas”, otorgado a la Dra. Marie-Noëlle Guilbaud y mediante el cual se obtuvieron los recursos necesarios para el financiamiento de este trabajo de tesis.

Al CONACYT por el apoyo para realizar este trabajo a través de la beca de manutención para estudiantes de tiempo completo, la cual fue brindada mediante el Programa de Becas para Estudios de Posgrado.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Instituto de Geofísica por los recursos asignados para permitirme asistir a congresos nacionales e internacionales, así como las prácticas de campo y las excursiones anuales de los estudiantes del Posgrado.

A la Dra. Marie-Noëlle Guilbaud, por su infinita paciencia para llevar a buen término este trabajo, por su apoyo, aliento y acompañamiento todo este tiempo, pero principalmente quiero agradecerle por permitirme acercarme al estudio de la vulcanología.

Al comité tutor, conformado por los Dres. Marie-Noëlle Guilbaud, Giovanni Sosa Ceballos y José Luis Arce Saldaña.

Al Jurado examinador, los Dres. Marie-Noëlle Guilbaud, Giovanni Sosa Ceballos, Edgardo Cañon Tapia, Pooja Vinod Kshirsagar y Peter Schaaf, por contribuir con sus observaciones y comentarios a la mejora de este trabajo.

A mi toda mi familia, por su apoyo incondicional y siempre estar a mi lado brindándome el cariño y voluntad para vivir el presente y anhelar el futuro.

A todos mis amigos y compañeros, por permitirme compartir con ustedes momentos importantes e irrepetibles, desde la seriedad y fortaleza que requiere la lucha y el debate, hasta el aguante que se necesita para una buena noche de fiesta, por todo lo compartido y por qué siempre tiran paro.

A quienes ya no están pero que en el recuerdo viven, a todas esas personas les dedico este trabajo.

Desarrollo, Neoliberalismo y Feminismo: Nociones para entender la crisis socioambiental y la construcción de alternativas al modelo hegemónico

Perspectivas antropológicas sobre el poder

El término de *Poder* como una concepción definida desde la perspectiva de las ciencias sociales, ha estado relacionado intrínsecamente con el rol que cumple dentro de la figura socialmente organizativa conocida como *Estado*, motivo por el cual se ha caído en un reduccionismo que, si bien lo define en un contexto particular, deja de lado generar una definición que pueda ser consensuada dentro de la academia y que persiste ausente, así como abierta a debate.

Es decir, las ciencias sociales han definido dicho concepto desde una perspectiva tan singular e inherente a un estructuralismo social, que causa miopía a la hora de dar una definición más amplia en donde sea posible realmente representar todas las esferas de influencia del concepto y que a su vez no se cometa el error de caer en un generalismo amplio e inacotable, en donde se tendría el problema actual, pero a la inversa. Ahora bien, continuando con la crítica podemos rescatar la definición presentada por Weber (1922) en su obra *Economía y sociedad: Por poder se entiende cada oportunidad o posibilidad existente en una relación social que permite a un individuo cumplir su propia voluntad*.

Se puede decir que al definirse desde dicho campo del conocimiento y en el particular estudio realizado sobre la figura del *Estado*, se ha rebasado el uso del concepto, generando sinónimos que no han sido explicados para permitir su uso fuera de un contexto tan singular y que, de ser así, se pueden poner en tela de juicio sus equivalencias, tales como: *fuerza, dominio, hegemónico, autoridad*. Estos sinónimos, si bien cumplen su función de equivalencia en un contexto determinado, fuera de él carecen de tal valor, solo por citar algún ejemplo, tomemos el término autoridad y problematicémoslo. En un contexto de una sociedad organizada en la cual existen figuras de *autoridad*, sujetas a ser respetables e inviolables dentro de un marco jurídico establecido (entiéndase una sociedad moderna occidental), dicha autoridad se presentaría como *hegemónica* en la relación de la persona con el marco de referencia organizativa al que pertenece, de esta manera el poder lo ejercería la autoridad para cualquier transgresión que causará la persona para con ella, es decir, la sociedad organizada reconoce y avala, legitima a la autoridad, y por lo tanto, en

este caso, autoridad tal vez pueda ser sinónimo de poder, en la perspectiva de quien ejerce y de quien es propio el poder.

Ahora bien, si nos encontramos en una sociedad que no se organice bajo figuras de autoridad ¿Cómo es que podría existir dicho sinónimo?, sí se pertenece a una sociedad donde no sea posible existir como subalterno de la estructura debido a su inexistencia, carecería de todo sentido y es ahí donde la definición presenta fundamentalmente su ausencia de universalidad.

Por su parte, Foucault (1992) en su obra *Microfísica del poder* presenta otro aporte a la construcción de la definición de poder pero que es limitada, ya que ve al poder totalmente desde una posición estructuralista, sin embargo, la propuesta de Eric Wolf (1991) en su texto *Figurar el poder*, ya antepone una visión más amplia en donde vislumbra cuatro distintas dimensiones del poder: personal, relacional, organizativa y estructural; aun así, carece de incluir el total de situaciones en donde el poder se materializa (esferas de influencia). Es por esto que se debe redefinir el concepto desde una perspectiva holística intentando entender como eje fundamental las relaciones que se generan entre individuos, y no las relaciones de individuos con otros individuos que representen una figura de la estructura organizativa, de tal forma que el fin de dicha perspectiva sea la deconstrucción del concepto, pero a su vez dotarlo de una acepción acotada para no caer en un generalismo que conlleve a más problemas, dicho de otro modo, no todas las relaciones existentes son relaciones de poder, sin embargo, todas las relaciones en un contexto y momento particular pueden llegar a ser de poder. Con esta idea en claro y como resultado del ejercicio sobre la construcción de la definición del concepto de poder, damos por concluido el debate del generalismo y se propone la siguiente definición de poder.

Poder: Relación entre dos o más sujetos en una sociedad (por sujeto entiéndase: individuo/personas o figura "de" que representa u ostenta "al", presente en la relación -*estructural o social*-) en la cual, en un momento (temporal) y contexto singular, una de las partes ejerce una acción de desequilibrio sobre la/s otra/s dentro de dicha relación para materializar influencia (influencia: entiéndase como las posibles esferas donde puede materializarse el poder -económica, estructural, política, comunicacional, familiar, emocional, etc.).

Nótese que esta definición se diferencia de la de Weber, al no hablar de posibilidades sino de ejercicio del poder, de la de Foucault al no ser solo estructuralista y de Eric Wolf al no

solo enmarcarse en cuatro esferas donde se ejerce; se amplía a todos los ámbitos posibles de materialización y ejercicio del poder con el concepto de influencia, desde una perspectiva relacional. Vale aclarar que las relaciones desde esta óptica tienden a ser equilibradas en su concepción natural y ninguna de las partes se encuentra en desventaja alguna con respecto de la/s otra/s, es cuando se rompe ese equilibrio por acción de alguna de las partes (sin importar motivación u objetivo, sino solo el hecho de) que se materializa el poder.

Genealogía del Desarrollo: Balance y percepciones hacia el futuro

A mediados del siglo XX, se construye un nuevo paradigma que tiene como supuesto el crecimiento en paralelo de lo económico y lo social, a través de la noción conceptual de *Desarrollo*. Este concepto es de suma importancia, ya que por primera vez se relaciona intrínsecamente y con la misma relevancia, el grado de crecimiento en el bienestar teniendo como base los servicios a los cuales pueden acceder los miembros de determinadas sociedades, así como un crecimiento económico sostenido (Perroux, 1969).

El concepto de *Desarrollo* es una acepción moderna que da un giro completo a su tradicional visión economicista sobre crecimiento utilizada e implementada históricamente, a través de modelos que han demostrado reiteradamente su fracaso, como la tesis del *Derrame* o *Chorro* (Ricardo, 1817) que nos remonta a los inicios del capitalismo y que lejos del fracaso mostrado, ahora se observa como algo realmente ridículo en lo teórico y práctico. Seguidamente, esta conceptualización moderna de *Desarrollo* ha sido revisada y actualizada, dándole incluso un carácter social y político de mayor envergadura, de la mano de Amartya Sen, quien en su libro *Libertad y desarrollo* expresa que *el desarrollo es un proceso de expansión de las libertades reales, de tal manera que exige la eliminación de las fuentes de privación de la libertad, entendiéndose como supresoras de la misma a la pobreza, tiranía, escasez de oportunidades económicas, intolerancia, exceso de intervención de los estados represivos*, por mencionar algunas. De tal manera que, la definición se extiende a todo aquello que vulnere en un momento determinado, las libertades de una sociedad capitalista liberal. Este nuevo paradigma que diverge de las doctrinas clásicas sustentadas por Adam Smith y David Ricardo es algo novedoso, para hacer énfasis en ello, es necesario realizar una revisión de las circunstancias de los trabajadores, así como los efectos que causaron durante su implementación y evolución,

para analizar en donde nos encontramos y que diferencias existen en la actualidad con respecto al pasado.

La revolución industrial trajo consigo el nacimiento de una nueva clase, así como un reordenamiento en términos político-económicos del Estado, adaptando los modelos económicos imperantes, los cuales provocaron una profunda reestructuración social. El nacimiento de la clase obrera trajo consigo, condiciones de pauperización aún mayores de las observadas en sociedades libres (pre-capitalistas) anteriormente, generando cordones proletarios donde se vivía de manera inhumana en las ciudades europeas.

Como respuesta a este sistema de explotación, se gesta la obra cumbre de Karl Marx (1867), en su libro *El Capital. Crítica de la Economía política*, en donde estableció que la explotación del trabajo es algo consustancial al modo de producción capitalista, en donde los obreros desprovistos de los medios de producción se ven obligados a vender su fuerza de trabajo, al concebirse como doblemente libres, libres de los medios de producción y libres de vender su única mercancía, la fuerza de trabajo. El fondo del problema se encuentra en el proceso de acumulación de capital por parte de los propietarios, a través de fijar un salario basado en un mínimo de subsistencia, por debajo del valor producido en la jornada del obrero, generando así plusvalía. Ahora bien, una vez generada la plusvalía y haciendo énfasis en que los medios de producción no pertenecen al obrero, el dueño de dichos medios se apropia *legalmente* del plusvalor, lo cual sucede en detrimento de los intereses del proletariado. Esto genera un malestar y una profunda división entre las clases, la cual, según Marx, decantaría en la lucha sistémica que transformaría los modos de producción, de tal forma que se busque como finalidad un nuevo modelo de producción, en donde se privilegie la socialización de los medios de producción y, en consecuencia, la distribución del excedente de trabajo humano. Este irreconciliable problema entre los efectos del capitalismo y las consecuencias de la lucha sistémica en su búsqueda de generar mejores condiciones, a ojos de Marx, se vislumbraba como algo estéril e insoluto, de tal manera que jamás resolvería los problemas económicos existentes (alcanzar una mejor distribución de la riqueza), además de presentarse como una de las contradicciones más profundas del capitalismo, que aunadas a otras terminarían destruyendo dicho sistema.

El desarrollo del pensamiento de Marx, condujo a que aquellos intelectuales defensores del modelo capitalista (neoclásicos) construyeran una respuesta, la cual, esgrimía como eje fundamental al sistema de precios, de oferta y demanda. Según ellos los mecanismos de

mercado logran generar equilibrios estables de forma única, automática y garantizada, producir precios donde se iguala la oferta y demanda, además de asignar recursos de forma eficiente y óptima, destacando que cualquier error cometido por productores y consumidores, será resuelto en el sistema de precios. Para ello se debe buscar generar el menor número de variables que puedan afectar el sistema de precios, por lo cual, se puntualiza como imprescindible la abstención del Estado, es decir que promueve, la no intervención.

A principios del siglo XX, surge una segunda revolución industrial, en donde el motor de combustión funge como piedra angular de los métodos de producción. En este contexto, comienzan a jugar un papel importante los *especuladores*, que conducirían al primer *Crack*¹ de la historia del sistema capitalista. En pocas palabras se especula con el valor de una empresa, intentando adquirir la mayor cantidad de títulos y acciones, sin embargo, esto puede conducir a la sobrevaloración, en el caso de que se confirme que en verdad existe la sobrevaloración, genera un efecto de distanciamiento de los precios y del valor real, generando al final una caída abrupta. Ahora imaginemos, este fenómeno en muchas empresas al mismo tiempo, es decir, en un sector de la industria productiva. Como consecuencia se obtiene una expansión de la pobreza, el crecimiento de monopolios, la quiebra de empresas, además de afectar a otras economías capitalistas. Esto sucedió en el año 1928 en los Estados Unidos, y se conoció como la gran depresión. La importancia de este fenómeno radica en que expuso lo ridículo del pensamiento liberal neoclásico, ya que, según sus fundamentos, no se tenía que hacer absolutamente nada, debido a que los mercados (según ellos) se recuperarían solos en medida de que los salarios se desplomaran. Sin embargo, los salarios ya se habían desplomado y no sucedía nada, no había recuperación alguna.

¹ El crack financiero es un repentino y dramático descenso de los precios de mercado a lo largo de una sección transversal del mercado de valores. Las quiebras van acompañadas tanto de pánico como de otros factores económicos subyacentes. A menudo son consecuencia de especulaciones y burbujas económicas. El crack de 1929 fue la mayor crisis jamás conocida que estalló el 24 de octubre. En esta fecha la bolsa de valores de Wall Street sufrió una caída en sus precios y esto provocó la ruina de muchos inversores, tanto grandes hombres de negocios como pequeños accionistas, el cierre de empresas y bancos. Esto conllevó al paro a millones de ciudadanos, pero el problema no solo quedó en Nueva York, esto se trasladó a casi todos los países del mundo como un efecto dominó. Afectó tanto a países desarrollados como a los que estaban en vías de desarrollo. Europa se estaba recuperando de las consecuencias de la Primera Guerra Mundial, entonces su situación empeoró. Lo que comenzó como un simple descenso de las cotizaciones en la bolsa de Nueva York, en el otoño de 1929, se convirtió, en poco tiempo, en la mayor crisis de la historia del capitalismo.

La solución vino de la mano de Keynes (1936) cuando publicó su Teoría *General de Interés, la Ocupación y el Dinero*, en donde estableció las bases para el manejo macro-económico, mediante herramientas fiscales, monetarias y cambiarias, echando por la borda, todos los preceptos liberales. Keynes dictó la directriz de acciones a implementar para lograr superar la Gran Depresión, para lo cual era medular la participación del Estado como herramienta de regulación e incentivación del mercado, generando las condiciones de certidumbre para que el sector privado invierta y produzca, con el fin de aumentar la demanda y consumo, dando lugar a un ciclo virtuoso de crecimiento económico inducido. En resumen, el Estado aumenta su gasto generando empleo, con los sueldos percibidos y el aumento del trabajo, se generan condiciones de demanda y consumo, lo cual atrae a los inversores a introducirse en dicha dinámica. Este proceso *Keynesiano* generó condiciones económico-sociales robustas y sólidas, que se conocen como el *Estado de bienestar* y fue la política económica rectora hasta la década de los setenta en la mayor parte del mundo capitalista. Es en esta década que surge el renacimiento de las ideas liberales que habían sido desechadas después de la Gran Depresión, impulsadas por Milton Friedman, las cuales se basan en políticas monetaristas conocidas como neoliberalismo. Dichas ideas son reciclaje puro del liberalismo, sosteniendo que los mercados son los mejores asignadores de recursos, ya que los Estados distorsionan al mercado y son corruptos, por lo cual deben salir de la esfera económica. Por lo tanto, surge la creciente expansión del mercado en detrimento de la participación del Estado, teniendo como resultado su sustitución en términos relativos.

Debido a la potente capacidad de producción de la innovación tecnológica y a la implementación del modelo neoliberal durante los últimos 40 años, hemos sido testigos del aumento de la producción desmedida, con la máxima empresarial de recuperar la inversión en el menor tiempo posible (tasa de retorno) sin importar las consecuencias de lo que ello implique. A partir de la ola privatizadora de los sectores estratégicos productivos del Estado, se observa un adelgazamiento sistemático del mismo, y por ende robustecimiento en igual magnitud del sector empresarial, llegando a formar consolidados globales con acumulación de capital que sobrepasa al propio de varios Estados. Es decir que, en los pocos años de establecimiento del *neoliberalismo* y como consecuencia directa de éste, se ha dado paso al surgimiento de empresas transnacionales hegemónicas de carácter global. Este modelo en 1928 dio como resultado una crisis mundial, hoy, a diferencia de la primera, se sufren las consecuencias particulares del neoliberalismo. Dichas consecuencias endémicas del modelo son, por mencionar algunas y tocando las más graves, el especial énfasis que ejerce el sector privado sobre la tasa de retorno, para lo cual no importa nada más que

generar las mayores ganancias aun a costa de crear problemas socioambientales como, la desertificación de regiones, el desplazamiento de comunidades, la contaminación de recursos hídricos, el despojo, etc. El neoliberalismo, sin más, se caracteriza por su inconsciente extractivismo y ese hambre voraz e insaciable por la acumulación de capital.

La crisis socio-ambiental que se vive actualmente, es resultado de los fracasos de los diferentes modelos mencionados aplicados o ajustados al capitalismo, por lo cual se puede concluir que dicha problemática es en sí misma, un fracaso del capitalismo como sistema político-económico hegemónico, sin embargo, es necesario reconocer que dichos fracasos han dado lugar a la revisión constante del sistema, generando nociones modernas como el propio *desarrollo sostenible*² e incluso algunas más complejas y completas como lo es la noción del *vivir bien*³ que ha ido extendiéndose dentro de Latinoamérica. Sin embargo, aun dicho lo anterior, también es necesario reconocer que, dentro del capitalismo, ha existido al menos algo semejante y con carácter de *desarrollo*, que iba en esa dirección, de tal manera que es posible afirmar, que el capitalismo en su ajuste *keynesiano* es sin lugar a duda la única faceta menos cruenta de ese sistema, y sí se pretende continuar dentro del mismo como sistema rector, debe de ir en dicho sentido. Ahora bien, para poder regresar a una directriz keynesiana, debemos revisar el estado actual que es muy diferente al necesario con respecto a lo mencionado por Keynes, para lo cual se tendría que comenzar a trabajar para generar las condiciones que se tenían antes del establecimiento del neoliberalismo y sus consecuencias. Es decir que, se debe comenzar por revertir el desmantelamiento del Estado en su sector productivo robusteciendo el sector interno y revertiendo las privatizaciones llevadas a cabo en las décadas pasadas, a su vez, comenzar con un proceso de desglobalización (evitar la interdependencia), así como, desarticular las empresas de carácter global. El problema consiste en que, el neoliberalismo dotó a dichas empresas del poder político y económico necesario para evitar la implementación de normas estatales que generen condiciones pre-neoliberalas, toda vez que el Estado se encuentra minimizado. Por su parte, hay que reiterar que de no revertir en alguna medida los efectos del neoliberalismo, el capitalismo está condenado y la única forma de

²En la declaración de Johannesburgo se establece que el Desarrollo Sostenible se entiende como el Proceso mediante el cual se satisfacen las necesidades económicas, sociales, de diversidad cultural y de un medio ambiente sano de la actual generación, sin poner en riesgo la satisfacción de las mismas a las generaciones futuras”.

³ El ser humano debe llegar al “Vivir Bien” que es “el equilibrio material y espiritual del individuo (saber vivir) y la relación armoniosa del mismo con todas las formas de existencia (convivir)”.

perpetuarse es volviendo a mirar a Keynes, sin embargo, también hay que reconocer que el capitalismo ha mostrado ser sobradamente adaptativo de los usos discursivos de la izquierda, mostrando su capacidad de apropiación y dilución conceptual de todo lo emancipador, de tal forma que el reformismo capitalista hegemónico nutre una intención que se condensa en cada argumentación esgrimida desde la centro derecha por limar las aristas más afiladas del capitalismo y así, lograr su perpetuidad, lo cual difiere conceptualmente pero no en la praxis de los reformistas social demócratas del siglo pasado que pretendían conducir al socialismo democrático dentro del capitalismo (algo en esencia confuso) por la vía gradual de las reformas, sin embargo debemos recordar que fracasaron pero este ejemplo nos sirve para observar claramente como se conforma la distorsión que genera el modelo imperante.

Hacia la construcción del movimiento del siglo XXI: El feminismo como precursor revolucionario

El feminismo es un movimiento político, cultural, económico y social, que ha desarrollado un planteamiento teórico con objetivos claros durante su progreso, teniendo actualmente como eje fundamental la igualdad entre mujeres y hombres en todos los ámbitos de la vida y la reivindicación de sus derechos. Para ello, se ha valido de cuestionar la dominación y la violencia de los varones sobre las mujeres y la asignación de roles sociales según el género, como una construcción social androcentrista.

La influencia del feminismo y sus resultados, pueden servir para realizar un primer acercamiento con el fin de cuantificar su impacto y trascendencia, de tal forma que a través de su desarrollo y evolución durante las tres *Olas* (desde el estudio clásico) que han marcado el progreso de dicho movimiento, ha conseguido cambios en ámbitos sociales muy significativos, como lo es el derecho del voto femenino, la igualdad ante la ley , así como los derechos reproductivos, entre muchos otros.

Sin embargo, estas conquistas no son más que simples generalidades que van en función de establecer las condiciones últimas y propias del actual feminismo, que más allá de la liberación de la mujer planteada en la tercera ola, se busca la igualdad de derechos además de una equidad en las oportunidades, erradicando los privilegios asignados y construidos por la sociedad desde una directriz unidimensional y heteropatriarcal.

De tal modo que, la lucha feminista es por demás vigente y reivindicativa, en el contexto del siglo XXI y además necesaria, ya que el actual modelo económico vigente, comienza a

generar las condiciones contrarrevolucionarias que conllevan a un retroceso al pretender someter los avances obtenidos a través de la lucha constante, y que ya permite observar situaciones tales como las que imperaban hace más de un siglo.

Ahora bien, con respecto al reconocimiento de las tres orientaciones que enfatiza Teresa de Babieri (1990) dirigidas al trabajo del concepto de género, cabe mencionar que no se contraponen, por el contrario y desde un estudio más amplio, estas se complementan, sin embargo, es posible discernir que tal y como son planteadas por la autora, corresponden a una visión acotada y reduccionista del amplio y complejo problema social que pretende atender, pero que al presentarlos con tal simplificación permite identificar puntualmente diferentes prácticas opresivas, de tal manera que Babieri (1990), desde mi perspectiva, pretende ser pragmática al señalar dichas prácticas para así evitar su reproducción, lo cual es resultado del acotamiento mencionado pero que debido a la naturaleza del análisis, corresponde a una solución solo para la mitad del problema, ya que tales prácticas representan una parte del problema, más no son el todo, dejando intacta la estructura de la cual emana la opresión, a lo que sí responde y plantea erradicar el feminismo en lo que parece ser el inicio de la cuarta ola del movimiento. Por su parte, la perspectiva que me parece más esclarecedora es la que trata el conflicto social-poder, ya que, desde este frente, se profundiza en la raíz de la desigualdad desde una óptica de mayor envergadura, al permitir analizar el problema desde la crisis social y la resolución del conflicto ejerciendo el poder del opresor, dando como resultado irreversible una situación de eterna subordinación, lo cual pone en manifiesto el complejo problema haciendo énfasis en la estructura de la cual emana la opresión, lo que se complementa perfectamente con el trabajo de Babieri (1990) y nos permite abordar el tema integralmente.

En la construcción, desarrollo y evolución del feminismo han existido planteamientos y perspectivas que diferencian el estadio de avance y alcance (olas) de dicho movimiento. Es decir que, desde su planteamiento inicial como una crítica a cuestiones de desigualdad, pasando a objetivos concretos como la adquisición de muy particulares derechos, hasta la concepción de liberación de la opresión y la búsqueda de establecer las condiciones de igualdad entre hombres y mujeres como seres humanos y sujetos de derecho (Varela N., 2008) es importante enfatizar que es un objetivo que concierne a ambos, ya que dentro de la propia concepción social estructurada de asignación de roles conforme al género, no solo vulnera a las mujeres como sujetos oprimidos, sino que a su vez el mismo hombre que tiene asignación de privilegios puede resultar vulnerado para cuando no se pretende asumir dicho

rol o en su caso, renunciar al ejercicio de los privilegios designados en la sociedad (Lamas, M., 1996). De tal modo que, el objetivo sociopolítico incumbe la participación de ambos, haciendo énfasis en que el feminismo ha sido incluyente en su desarrollo y no busca oprimir a su opresor, sino erradicar la opresión, es por eso por lo que el feminismo tiene connotaciones humanistas, pero no viceversa (el feminismo es un humanismo, pero el humanismo no es feminismo).

Debido a esto, considero que el feminismo por su vigencia e incidencia dentro del nuevo siglo puede ser considerado como el movimiento fundamental del siglo XXI, además de ser aquel que puede generar las condiciones precursoras de un proceso revolucionario en este siglo, desde una perspectiva de complemento a otros procesos de menor incidencia, pero de similar relevancia con un sentido en dirección hacia la trascendencia y condensación de la noción del vivir bien. Sin embargo, es evidente que las conquistas han servido solo como paliativos desde la estructura institucional del Estado, ya que, al realizar una revisión de los avances del feminismo con base en las últimas cifras publicadas, es evidente que, en el mejor de los casos, los avances obtenidos en cuestión de derechos representan ser no más que un simple placebo para lo planteado por el feminismo actual y su objetivo final.

La lucha constante, así como la visibilización de la subordinación histórica de las mujeres, acompañado del gran empuje que recibió el movimiento en su segunda ola, permitieron su inclusión dentro de las políticas de planeación en las políticas de desarrollo. Sin embargo, cabe destacar el fracaso rotundo exhibido tanto en la planeación, implementación y resultado. El fracaso radica en que el modelo hegemónico imperante de desarrollo se centra en generar condiciones económicas suficientes que eventualmente den como resultado la reducción de la brecha existente entre hombres y mujeres, particularmente en materia de ocupación laboral. Para lo cual hace uso de una serie de políticas y normativas que son implementadas sin una perspectiva de género, por lo que aun en el supuesto de que se lograra generar las condiciones óptimas (lo cual nunca ha sucedido), se encuentra condenado al fracaso desde su Génesis, ante la imposibilidad de desarticular el sistema de subordinación y marginación al cual responde desde su concepción, debido a que los contextos culturales imposibilitan la reducción de dicha disparidad al no trastocar las prácticas históricas inequitativas resultantes del sistema de dominación, debido a la ausencia del enfoque de género (Kabeer. N., 1998).

La inclusión de las mujeres tanto en el discurso, así como la implementación de políticas dentro del modelo de desarrollo, posibilitó un amoldamiento del mismo, pero con un *interés* en las mujeres como agentes del sector productivo, señalando su participación e generando condiciones de inclusión que pretenden atender la subutilización y marginación asignada inicialmente dentro del desarrollo, este amoldamiento y cambio en la dirección política del modelo es conocido como *Mujeres en el Desarrollo: MED*, con este enfoque, se hace énfasis en un cambio de paradigma en el que se deja de lado cómo es que el desarrollo afecta a las mujeres y pasa a señalar como las mujeres afectan al desarrollo, centrando la discusión en que las mujeres son parte importante del sector productivo y si se dejan fuera del modelo, el desarrollo no alcanza su máximo potencial. Sin embargo, al ser *fundamentalmente* el mismo concepto, solo que ahora *más amplio o incluyente*, este vio su mayor alcance en el ámbito discursivo, que, si bien es importante, existe un defecto en el caso de materializar el discurso e implementar políticas que se traduzcan en un cambio real que vulnere la asimetría existente y que genere un impacto o logros realmente importantes, que no está demás decir que existen pero que son realmente escasos (Kabeer. N., 1998; De la Cruz, C., 1998). Esto es posible observarlo en los estudios estadísticos más recientes, los cuales toman en cuenta multitud de países de todo el globo, en donde se comparan en materia laboral y económica, la disparidad y su reducción en países con diferente índice de desarrollo muestran como resultado un mismo escenario desalentador, dejando manifiesto que la brecha sigue existiendo, además de que prácticamente no se reduce (ONU, 2015).

Es por ello qué se han planteado nuevos enfoques que pretenden dar solución a este problema y los cuales, sí se fundamentan con una perspectiva de género, de tal manera que atacan el problema desde la conceptualización misma de la estructura social de la asignación simbólica de la falsa dicotomía hombre-mujer en el sector productivo-consumista de las economías. Un ejemplo es el enfoque de *Género en el Desarrollo: GED*, que parte del reconocimiento de la relación subordinada que tienen las mujeres con el fin de promover la eficiencia y la identificación de las oportunidades para mejorar la redistribución de género y la equidad, además de buscar el “empoderamiento” de las mismas, así como el de los colectivos en desventaja incluyendo la satisfacción de todas las necesidades prácticas de género para asegurar la alimentación, vivienda, agua y autosuficiencia económica., sin embargo, cabe mencionar que el mayor alcance y envergadura de este enfoque, se encuentra en que cuestiona el modelo de desarrollo dominante, reclamando un “desarrollo humano” con características de equidad y

sostenibilidad, buscando la superación de las desigualdades estructurales a través del poder de la movilización de la comunidad (De la Cruz, C., 1998).

Este enfoque diverge mucho del MED, el cual he criticado y señalado su fracaso como consecuencia de ser conceptualmente desarrollo. En el caso del GED, aun cuando en un primer acercamiento se aprecia agradable en todos los sentidos, debo de realizar el mismo ejercicio y valorarlo de igual manera que al MED. Por lo tanto, desde mi perspectiva el GED, estaría condenado al mismo fracaso mostrado por el MED, ya que parte de la misma concepción fundamental de desarrollo, con lo cual pretendo decir que, si bien el enfoque es algo novedoso, y puede dar soluciones, no es el enfoque el genera o pueda dar solución al problema de fondo, sino que este recae en el modelo imperante, que a su vez recae en el sistema hegemónico. Un cambio en el enfoque dará soluciones parciales, y los problemas que genera no son propios del enfoque, sino que a su vez trae consigo problemas del modelo al que se supedita. Por lo tanto, los problemas actuales son resultado de la crisis del sistema capitalista, en donde el modelo económico vigente es el neoliberalismo, y en donde se pretende transformar al concepto de desarrollo. Ahora bien, si se escucha imposible el cambio de sistema, una solución de mayor envergadura al cambio conceptual es un cambio en el modelo económico, es decir, el neoliberalismo.

Hay que mencionar que el feminismo ha sido un movimiento que, en su evolución, ha logrado enlazar victoria tras victoria, inventando y transformado formas de lucha, comunicación y organización, por lo cual no me queda duda alguna que su último fin pueda alcanzarse, de la mano de lo que ya nos ha mostrado anteriormente, un replanteamiento y reinención en la conducción teórico-práctica del movimiento y todo lo que ello implica, condiciones que solo este movimiento nos ha mostrado en su continua evolución, y que en estos momentos podemos observar que al menos ha logrado penetrar ciertos nichos antes vistos como imposibles, a tal grado de formular replantear concepciones como desarrollo, dejando en claro que poco a poco sigue avanzando y permeando dentro de las rígidas estructuras institucionales, tal vez no al ritmo deseado, pero se encuentra en todo momento presente. No veo lejano ni imposible, un escenario futuro en donde no solo permita la reformulación conceptual de desarrollo, sino que logre cambiar el modelo imperante. Basta recordar a Varela (2008), quien menciona que *el feminismo (como el conjunto de todos los feminismos) es en esencia estridente, disruptivo y emancipador ¿Por qué? Porque cuestiona el orden establecido, el cual se encuentra muy bien establecido por quienes lo establecieron, es decir, para quienes se benefician de él.*

Retomando nuestro punto de partida sobre el *Poder* podemos observar que el feminismo tiene una consecuencia natural en sus planteamientos para la estructura social, ya que si advertimos lo que menciona Varela (2008), entonces las relaciones están en todo momento desequilibradas, es decir que el *Poder* se materializa en todo momento por el orden establecido, de tal forma que sí el feminismo apela a una equidad relacional y además abonamos que ha ido conquistando espacios que en algún momento se veían imposibles, está trastocando el desequilibrio planteado inicialmente, apelando a llevar las relaciones a un estado de equilibrio natural, de esta manera la magnitud con que se ejerce el poder disminuye, de tal forma que cuestiona los diversos espacios, el público, privado y doméstico, y es ahí donde se encuentra lo radical del movimiento, su innegable vigencia y su futuro, ya que nos permite concluir que por ende en el siglo XXI *la revolución será feminista o no será.*

Bibliografía

- De Barbieri T., 1990. Sobre la categoría género. Una introducción teórico-metodológica. En conferencia ofrecida en los marcos del Taller sobre Derechos Reproductivos organizado por PRODIR. CDIM, La Habana.
- De la Cruz, C., 1998. Guía metodológica para integrar la perspectiva de género en proyectos y programas de desarrollo. Emakunde/Instituto Vasco de la Mujer. 1998.
- Foucault, M., 1992. Microfísica del poder. Ediciones de La Piqueta. Madrid.
- Huanacuni, F., 2010. "Vivir Bien / Buen Vivir", La Paz, Bolivia: III-CAB.
- Kabeer, N., 1998. Realidades Trastocadas. Las jerarquías de género en el pensamiento del desarrollo. Paidós, México.
- Keynes, J. M., 2006. Teoría General de la Ocupación, el Interés y el Dinero. Fondo de Cultura Económica, 4 ed, México.
- Marx, K., 1973. El Capital. F.C.E., México. [Original en alemán 1867].
- Lamas, M., 1996. Usos, dificultades y posibilidades de la categoría de género, M. Lamas (comp.), El género: la construcción cultural de la diferencia sexual, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Programa Universitario de Estudios de Género (PUEG).
- López-Fernández de Lascoiti, E., 2009. CRACK de 1229: Causas, desarrollo y consecuencias. Revista Internacional del Mundo Económico y del Derecho. Universidad Autónoma de Madrid. Vol. I., España.
- ONU, 2002. Declaración de Johannesburgo. Documento en línea. Disponible en: <http://bit.ly/2mg0fMj> [Consultado el 16 de febrero de 2019]
- ONU, Mujeres, 2015. Hechos y cifras: Empoderamiento económico. Documento en línea. Disponible en: <http://bit.ly/2IL7V99> [Consultado el 13 de noviembre de 2017]
- Perroux, F., 1974. La economía del siglo XX. Ediciones Tercer Mundo, Mexico D.F., Mexico. [Original en francés 1969].
- Quiroga-Martínez, R., 2003. Naturaleza, Culturas Y Necesidades Humanas: Ensayos de Transformación. LOM Ediciones, Mexico D.F., Mexico.
- Ricardo, D., 1959. Principios de Economía Política y Tributación. Fondo de Cultura Económica, México D.F., México. [Original en inglés 1817]
- Sen, A., 2000. Libertad y Desarrollo. Planeta, Buenos Aires, Argentina.
- Varela N., 2008. Feminismo para principiantes, Barcelona, Ediciones B. Grupo Zeta.
- Valcárcel, A., 2001. La memoria colectiva y los retos del feminismo. Naciones Unidas. Santiago de Chile.
- Weber, M., 1922. Economía y sociedad. En Fondo de cultura económica (FCE Colombia) 1997.
- Wolf, E., 2001. Figurar el poder. Ideologías de dominación y crisis (Rheault, Katia, trad.), Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS).

ÍNDICE

DECLARATORIA	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3. HIPÓTESIS	2
1.4. OBJETIVOS	3
1.5. ANTECEDENTES: MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO	3
1.5.1. LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA (FVTM)	3
1.5.2. EL CAMPO VOLCÁNICO SIERRA CHICHIAUTZIN (CVSC)	9
1.5.3. EL VOLCÁN DOS CERROS Y VOLCANES ALEDAÑOS	12
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	17
2.1. TRABAJO DE GABINETE	17
2.2. TRABAJO DE CAMPO	18
2.3. TRABAJO DE LABORATORIO	20
CAPÍTULO III: RESULTADOS	23
3.1. CARTOGRAFÍA	23
3.2. DEPÓSITOS DE CENIZA: DESCRIPCIÓN, RELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y DISTRIBUCIÓN	31
3.3. FECHAMIENTOS	37
3.4. MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	43
3.4.1. DOS CERROS	44
3.4.2. CUETEPEL	48
3.4.3. CERRO DEL AGUA	51
3.5. GEOQUÍMICA	56

CAPITULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	71
4.1. ACTIVIDAD VOLCÁNICA RECIENTE EN SECTOR ORIENTAL DEL CVSC: RECONSTRUCCIÓN DE LA SECUENCIA DE EVENTOS DENTRO DEL ÁREA	71
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE LAS TRES ERUPCIONES PRINCIPALES	73
4.3. IMPLICACIONES DE LOS NUEVOS DATOS QUÍMICOS PARA ESTUDIAR EL ORIGEN DE LOS MAGMAS INTERMEDIOS EN EL CVSC	79
4.4. CONCLUSIÓN	82
REFERENCIAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

- Figura 1 Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM, gris) y sus cuatro sectores, el Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC) y el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) en rojo, en el sector oriental y central respectivamente, así como, la configuración de las placas tectónicas actuales y las principales provincias fisiográficas de México. OCC=Sector Occidental; CEN=Sector Central; EO=Sector Extremo Oriental (4)
- Figura 2 Variaciones en el espesor cortical a lo largo de la FVTM (7)
- Figura 3 Profundidad de subducción a la que se encuentra el slab; la línea negra muestra la profundidad de 100 km que coincide con el frente de la FVTM; los triángulos corresponden a los estratovolcanes: Co=Colima, Po=Popocatépetl (7)
- Figura 4 Se muestran los diferentes terrenos tectonoestratigráficos sobre los cuales se emplaza la FVTM (amarillo). Los triángulos y círculos (rojos) representan los estratovolcanes y calderas más importantes respectivamente. Los cuadrados (grises) representan las ciudades México y Guadalajara (de este a oeste) como referencias (9)
- Figura 5 Delimitación territorial de las entidades federativas dentro de las cuales se ubica el Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC) (10)
- Figura 6 Localización dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), del Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC, en rojo), Dos Cerros (azul), Cuatepel (verde), Cerro del Agua (amarillo); NT=Nevado de Toluca; PT=Popocatépetl; IZ=Iztacihuatl (10)
- Figura 7 Imagen de LIDAR que muestra el área cubierta por los flujos (escudo, morado) y los conos de escoria, de Este a Oeste se pueden observar La Ninfa y Tezpomayo (DC, amarillo), así como Cuajomoc y Ayaqueme (sepultados, naranja) (13)

Figura 8 Secuencia tipo de la Pomez Tutti Frutti. GT-Gray Tefra[, MT milky pumice-MT pómez blanquecina, MT orange pumice-MT pómez anaranjada, P01-Flujo piroclástico 01, P02- Flujo piroclástico 02 (19)

Figura 9 Se observa la unidad MT del depósito conocido como pómez “Tutti Frutti”, correspondiente a la erupción pliniana del volcán Popocatepetl de hace 17,000 años A.P., tal como aflora en el área de estudio. Nótese la gran cantidad de diferentes fragmentos que lo constituyen (pómez blanca a amarilla, líticos grises a verdosos), los cuales son muy distintos a los depósitos producidos por los volcanes monogenéticos en el área de estudio que constan principalmente de ceniza gris (20)

Figura 10 a) Mapa del área de estudio basado en imágenes LIDAR. Se muestran los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA=Cerro del Agua, CT=Cuatepel y DC=Dos Cerros (25)

b) Mapa del área de estudio basado en imágenes LIDAR. Se muestran las diferencias en elevaciones, los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA=Cerro del Agua, CT=Cuatepel y DC=Dos Cerros (26)

c) Mapa del área de estudio basado en imágenes satelitales. Se muestran, los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores,

(2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA=Cerro del Agua, CT=Cuatepel y DC=Dos Cerros (27)

d) Mapa del área de estudio basado en OMS. Se muestran, los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ¹⁴C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA=Cerro del Agua, CT=Cuatepel y DC=Dos Cerros (28)

e) Se muestran los mapas anteriores con una perspectiva en 3d del área de estudio, donde es posible observar los flujos de lava y conos de escoria asociadas a las tres erupciones estudiadas. CA=Cerro del Agua, CT=Cuatepel y DC=Dos Cerros (29)

Figura 11 Se muestran algunos volcanes dentro del área de estudio. a) Sección N-S, tomada en dirección Oeste, desde la carretera federal 115 México-Cuautla. b) Sección S-N, tomada en dirección Este, desde las inmediaciones del volcán Huehuel (30)

Figura 12 Se muestra el depósito piroclástico de caída correspondiente al volcán Dos Cerros. Nótese la homogeneidad que presenta la secuencia en el tamaño de grano. A. Sección proximal (2.3 km del cono); B. Sección distal (7.7 km del cono) (33)

Figura 13 Se muestra el depósito de caída correspondiente al volcán Cuatepel. Nótese las capas endurecidas de color marrón y los cambios en el tamaño del espesor. A. Sección proximal (2.3 km del cono); B. Sección distal (5.5 km del cono) (34)

Figura 14 Se muestra el depósito de caída correspondiente al volcán Cerro del Agua. Nótese las capas endurecidas de color marrón, así como los cambios en el tamaño de grano correspondiente a las capas grises deleznales. A. Sección proximal (6.7 km del cono); B. Sección medial (7.7 km del cono) (34)

- Figura 15 Se muestra la correlación de los productos de las diferentes erupciones estudiadas dentro del área. Además, se incluyen datos de los horizontes muestreados y se indica, el tipo de análisis realizado a dichas muestras (químico, lamina delgada, datación) (36)
- Figura 16 Fenocristal de Ol con inclusiones de cromitas embebido en matriz oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-23-C1 (46)
- Figura 17 Microfenocristal de Cpx con bordes de Opx, embebidos en matriz vítrea clara (sideromelano). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-23-C1 (46)
- Figura 18 Microfenocristal de Cpx como núcleo con inclusiones de cromitas al centro de la microfotografía, siendo reemplazado por Opx. También se pueden observar (arriba a la izquierda) los aglomerados que forman los microfenocristales y microlitos de Pl. Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-23-D2 (47)
- Figura 19 Microfenocristal de Pl embebidos en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-23-B2 (47)
- Figura 20 Fenocristal de Ol con inclusiones de cromitas. Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-29-B0 (49)
- Figura 21 Fenocristal de Ol con inclusiones de cromitas. Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-29-E0 (50)
- Figura 22 Microfenocristal de Opx con inclusiones de cromitas embebidos en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-29-B0 (50)
- Figura 23 Fenocristal de Pl que presenta zonamiento + maclado polisintético, además de encontrarse embebido en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-29-F0 (51)
- Figura 24 Fenocristal de Ol con inclusiones de cromitas y vidrio, embebido en matriz vítrea clara (sideromelano). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-40-A (53)

- Figura 25 Microfenocristal de Cpx con bordes de Opx. embebidos en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-40A (53)
- Figura 26 Microfenocristal de Cpx como núcleo con inclusiones de óxido. Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-22B. (54)
- Figura 27 Fenocristal de Pg que presenta zoneamiento, además de encontrarse embebido en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-22B (54)
- Figura 28 a) Diagrama TAS (Le Bas et al., 1989) donde se muestra el espectro de composición y el campo al que corresponden los productos de las erupciones dentro del área de estudio. Línea gris punteada muestra la separación entre el campo sub-alcalino y el campo alcalino según MacDonald y Katsura (1964). Valores son en % en peso. b) Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) que permite distinguir la afinidad entre las series Toleítica y Calcialcalina. $Alk = Na_2O + K_2O$, $FeO^* = FeO + Fe_2O_3$, $MgO = Cont. MgO$. Los valores son en % en peso. DC=Dos Cerros, CT=Cuatepel, CA=Cerro del Agua, LJ=La Joya, AH=Aholo, TN=Tenango, CJ=Cuajomol, FTL=Flujo Tlacotenco, Mt=Metepec, TY=Tenayo, TP=Tapeixte, FNI=Fuente No Identificada (58)
- Figura 29 a) Relación del #Mg con respecto al SiO₂ (% en peso). La línea punteada indica el límite a partir del cual se considera los productos como primitivos. b) Relación MgO (% en peso) con respecto al Ni (ppm). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la leyenda de la Figura 28 (62)
- Figura 30 Diagramas binarios de elementos mayores (Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, MnO, MgO, TiO₂, CaO, Na₂O, P₂O₅) vs SiO₂ (% en peso). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la leyenda de la Figura 28 (63)
- Figura 31 Diagramas binarios de variación de elementos traza (en ppm) para todos los datos. Los símbolos se definen en la Figura 28 (64)

Figura 32	Diagramas que muestran Mg#, Ni (ppm), y Sr (ppm) de las tefras con respecto a la distancia al centro de emisión, así como dentro de la secuencia tipo para los volcanes Dos Cerros (rojo) y Cuatempel (verde)	(67)
Figura 33	a) Diagramas de Tierras Raras (REE por sus siglas en inglés) normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989). b) Diagramas de elementos traza (diagramas de araña) normalizados al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la Figura 28	(69)
Figura 34	Reconstrucción de la secuencia de los eventos eruptivos dentro del área de estudio. FNI=Fuente no identificada. Las edades son convencionales, promediadas y redondeadas, además, nótese al margen derecho los eventos con edades relativas mínimas. También, se presentan las variaciones del % de SiO ₂ en peso para las diferentes erupciones	(72)
Figura 35	Isopacas para los productos piroclásticos de caída de Dos Cerros	(75)
Figura 36	Isopacas para los productos piroclásticos de caída de Cuatempel	(76)
Figura 37	Diagramas de variación química de las secuencias tipo de tefras caracterizadas para los volcanes Dos Cerros, Cuatempel y Cerro del Agua. a) Ni vs Altura, b) CaO vs altura, c) MgO vs altura	(78)
Tabla 1	Datos comparativos recogidos de la literatura existente de los volcanes dentro del área de estudio	(16)
Tabla 2	Se muestra los diferentes tamices utilizados y sus equivalencias	(21)
Tabla 3	Se muestran todas las dataciones utilizadas en este trabajo. La Tabla de datos 3a son propiamente los fechamientos realizados en este trabajo, por su parte la Tabla 3b corresponde a las dataciones reportadas en la literatura por diversos autores y recuperadas para este trabajo. Las dataciones que se presentan por separado corresponden a datos incongruentes con respecto a las relaciones estratigráficas	(41)
Tabla 4	Edades relativas de las erupciones del área de estudio obtenidas a través de relaciones estratigráficas. Pre=más antiguo, Post=más reciente.	(43)

- Tabla 5 Análisis modal de los productos piroclásticos del volcán Dos Cerros. Los valores están en % del volumen total sin contar las vesículas. El conteo fue de 1000 puntos para cada lámina delgada. Feno=fenocristal, Micro=microfenocristal (45)
- Tabla 6 Análisis modal de los productos piroclásticos del volcán Cuatepel. Los valores están en % del volumen total sin contar las vesículas. El conteo fue de 1000 puntos para cada lámina delgada. Feno=fenocristal, Micro=microfenocristal (49)
- Tabla 7 Análisis modal de los productos piroclásticos del volcán Cerro del Agua. Los valores están en % del volumen total sin contar las vesículas. El conteo fue de 1000 puntos para cada lámina delgada. Feno=fenocristal, Micro=microfenocristal (52)
- Tabla 8 Se presenta el rango de % en peso de SiO₂, campo composicional y su composición predominante para todas las erupciones presentes en la Figura 28a,b (57)

DECLARATORIA

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 aparece debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Néstor López Valdés

RESUMEN

El vulcanismo monogenético es muy extenso en México. El Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC) es el segundo campo con mayor densidad de edificios monogenéticos recientes en la Faja Volcánica Transmexicana. El CVSC es de gran interés ya que en él se encuentran una amplia diversidad de estructuras (domos, conos de escoria, flujos de lava viscosos y volcanes escudo de tamaño mediano), así como un amplio rango composicional que varía desde basalto hasta dacita.

Este trabajo presenta un análisis estratigráfico, petrográfico y geoquímico detallado de los tres volcanes más importantes en el sector oriente del CVSC (Dos Cerros, Cuatempel y Cerro del Agua), los cuales han producido extensos depósitos de tefra.

Aplicando el método de radiocarbono en paleosuelos debajo de las tefras, fechamos a los volcanes Cuatempel con 28,600 años A.P., Dos Cerros en 18,500 años A.P., y Cerro del Agua con 16,300 años A.P. (todas las edades son calibradas, promediadas y redondeadas). También proponemos edades preliminares para los volcanes La Joya (39,700 A.P.), Ocusacayo (26,000 A.P.), Tapeixte (24,200 A.P.), Aholo (22,500 A.P.), Sochol (19,100 A.P.), y Ocoxusco (36,100 A.P.), además de edades relativas estratigráficas para otros 20 volcanes en la zona de estudio.

Al estudiar con detalle las tefras, identificamos que los depósitos de Dos Cerros, Cerro del Agua y Cuatempel presentan características distintas en cuanto a tamaño de grano, vesicularidad y contenido de cristales dentro de la secuencia. También presentan ensambles mineralógicos distintos y cubren rangos composicionales diferentes en ciertos elementos traza como Sr, La, Nb, Ba, Th, Zr, y en elementos menores como K_2O y P_2O_5 .

Estos resultados son importantes por cuestiones de identificación del origen de capas de tefra en la cuenca de México, y estudios sobre el origen y evolución de los magmas en el CVSC.

ABSTRACT

The monogenetic volcanism is quite extensive in Mexico. Sierra Chichinautzin Volcanic Field (SCVF) is the second field in density of recent monogenetic structures within the Transmexican Volcanic Belt. SCVF is of great interest due to its wide diversity of structures (domes, cinder cones, viscous lava flows, and middle-size shield volcanoes), as well as a wide range in composition that may vary from basalt to dacite.

This paper presents a detailed stratigraphic, ^{14}C , petrographical and geochemical analysis of three major eruptions in the eastern sector of the CVSC (Dos Cerros, Cuatempel, Cerro del Agua), which have produced extensive tephra fallout deposits.

Dating paleosols using radiocarbon, the Cuatempel volcano was dated as to 28,600 years B.P., the Dos Cerros volcano as to 18,500 B.P., and the Cerro del Agua volcano as to 16,300 years B.P. (all ages are calibrated, averaged, and rounded off). The preliminary ages for the following volcanoes are a proposal to be considered as for La Joya volcano (39,700 B.P.), Ocusacayo (26,000 B.P.), Tapeixte (24,200 B.P.), Aholo (22,500 B.P.), Sochol (19,100 B.P.), and Ocoxusco (36,100 B.P.) all along with stratigraphic relative ages for other 20 volcanoes in the target area.

It was also possible to identify that the tephtras corresponding to Dos Cerros, Cerro del Agua, and Cuatempel differ in characteristics regarding grain size, crystal content, and vesicular texture, within the sequence. In addition, they also present different mineral assemblies, and they range compositionally distinctive for some trace elements as Sr, La, Nb, Ba, Th, Zr, as well as for minor elements as K_2O and P_2O_5 .

These results are of vital importance for the identification of the origin of the tephra layers in the Mexican basin, and for new studies on the origin and evolution of the magmas in the SCVF.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

El vulcanismo monogenético es muy extenso en el planeta y particularmente en México. El Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC) es uno de los campos más grandes y recientes que se encuentran dentro de la provincia fisiográfica llamada Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), además de estar ubicado en inmediaciones de la zona con mayor densidad de población en el país (Ciudad de México), donde existen estudios de erupciones recientes (Volcán Xitle, 1665 \pm 35 años A.P. Siebe, 2000; Volcán Chichinautzin, 1835 \pm 55 años A.P. Siebe et al., 2004a). Dentro del CVSC podemos encontrar una diversidad de estructuras, como los son domos, conos de escoria, flujos de lava fisúrales y grandes flujos coronados por conos de escoria, estos últimos conocidos como volcanes escudos medianos (volcanes escudo en lo siguiente).

La edad y composición química de los volcanes en los sectores occidental (Bloomfield, 1975) y central (Siebe et al., 2004, 2005, Guilbaud et al., 2015) del CVSC son relativamente bien conocidas, mientras que no existen mapas completos de la porción más oriental del campo. En esta área, el Volcán Dos Cerros (DC) pertenece a los denominados volcanes escudos, que son las estructuras más grandes y con mayores volúmenes emitidos dentro del CVSC (Agustín-Flores et al., 2011, Lorenzo-Merino et al., 2018). Se reporta una edad de >14,100 años A.P., para esta erupción y existen estudios sobre las lavas del escudo (Agustín-Flores et al., 2011), sin embargo, no existen datos sobre los productos de caída emitidos. A su vez, el volcán Cerro del Agua (CA) es un cono truncado que presenta un colapso de la estructura hacia SE, con lavas y piroclastos como productos asociados a la erupción. Existen estudios previos sobre las lavas del CA (Agustín-Flores et al., 2011) y algunos datos de los productos de caída (Guilbaud et al., 2015). En cuanto a la edad, existen dos fechamientos por radiocarbono de 10,845 + 290/-280 y 13,760 + 201/-205 años A.P. (Guilbaud et al., 2015), los cuales permiten acotar su edad. Por último, el volcán Cuatempel (CT) se presenta como un cono truncado con productos de caída y lavas asociadas a la erupción. Para este volcán existe un fechamiento reciente por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 33,932 \pm 5,000 años A.P. (Jaimes-Viera et al., 2018), sin embargo, no existen estudios previos de sus productos, salvo un par de datos químicos correspondientes a dos bombas (Straub et al., 2008).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El conocimiento existente sobre la historia eruptiva del CVSC es solo parcial, se reportan aproximadamente 80 fechamientos por radiocarbono en paleosuelos para todo el campo, correspondientes a centros eruptivos y flujos de lava emplazados (García-Palomo et al., 2002; Siebe et al., 2004a, 2005; Flores et al., 2011; Arce et al., 2013; Guilbaud et al., 2009a, 2015; Lorenzo-Merino et al., 2018; Jaimes-Viera et al., 2018), lo cual no permite la estimación precisa de tasas de recurrencia de la actividad; conforme exista un mayor aporte de datos para ampliar el catálogo, dicha tasa podrá ir afinándose de tal manera que pueda generarse mayor certidumbre; además, existen muy pocos estudios sobre los productos piroclásticos de caída (ceniza) para los volcanes escudos y los conos de escoria (Guilbaud et al., 2009a; Roberge et al., 2015; Lorenzo-Merino, 2018) dentro del CVSC, de igual manera, la situación es la misma dentro de la FVTM, por lo que se desconoce el potencial explosivo de estas erupciones, a excepción del trabajo realizado por Lorenzo-Merino (2018) en el Volcán Pelado, ubicado dentro del CVSC. En este trabajo se propone estudiar a detalle las erupciones recientes más importantes en la zona Este del CVSC mediante cartografía, fechamiento de paleosuelos, estratigrafía, y análisis de la petrografía y composición química de ceniza y lavas), para relacionar estos resultados con trabajos previos en la zona (Guilbaud et al., 2009a, 2015; Agustín-Flores et al., 2011), además de ampliar y conformar un robusto catálogo de datos.

1.2 HIPÓTESIS

Durante los últimos ~40,000 años, han ocurrido varias erupciones explosivas en la porción oriental del CVSC, las cuales pueden ser fechadas por radiocarbono en paleosuelos ubicados justo debajo de sus productos, permitiendo establecer la edad de las erupciones más recientes en la zona. Estudios recientes realizados por Guilbaud y colaboradores (2015), han revelado que los volcanes Dos Cerros y Cerro del Agua han producido depósitos de cenizas extensos aunados a los flujos de lavas. El estudio de la edad, distribución, petrografía, y composición química de los depósitos de ceniza asociados a los volcanes Dos Cerros, Cerro del Agua, y otros recientes en la parte oriental del CVSC permitirá refinar y aportar conocimiento sobre el tipo de actividad que tuvo lugar en esta región y el alcance de sus productos. Un mejor conocimiento sobre la edad de las

erupciones, y las características de los productos piroclásticos asociados en la parte Este del CVSC, es de suma importancia para poder entender, lo mejor posible el contexto en el que se desarrolla la actividad (periodo de recurrencia, volúmenes emitidos), así como, el rango de estilos eruptivos que presenta, Estos trabajos se justifican ampliamente por la cercanía del CVSC con zonas urbanizadas. Existen evidencias de afectaciones por dicha actividad, como sucedió con la erupción del volcán Xitle, la cual posiblemente causó el desplazamiento de comunidades hacia el norte de la cuenca (Gonzales et al., 2000; Siebe, 2000). Los resultados serán también de utilidad para identificar las cenizas asociadas a estas erupciones en la Ciudad de México (Ortega et al., 2015) y dentro del mismo sector oriental del CVSC, a su vez, se establecerá una base de datos para realizar una caracterización geoquímica de los magmas más amplia, así como, establecer modelos petrogenéticos en futuras investigaciones.

1.3 OBJETIVOS

Identificar y establecer las edades y características estratigráficas, petrográficas y geoquímicas de las erupciones recientes mayores del sector este del CVSC y reconstruir la secuencia de erupciones en el área de estudio durante los últimos 40,000 años A.P.

1.4 ANTECEDENTES: MARCO GEOLOGICO Y TECTONICO

1.4.1 LA FAJA VOLCANICA TRANSMEXICANA (FVTM)

La FVTM es una provincia fisiográfica, la cual se extiende de Este a Oeste por el centro del país con una longitud de 1000 km y una anchura variable de 80 a 230 km, comprendiendo latitudes de 19° a 21° (Figura 1). Es la provincia volcánica más extensa, compleja y activa del país; al Este limita con el Golfo de México y al Oeste con el Océano Pacífico, es un arco volcánico que se ha desarrollado desde el Neógeno y ha sido subdividido tradicionalmente con base en su geología y tectónica en tres sectores: Occidental, Central y Oriental (Demant, 1978; Pasquaré et al., 1988). Estudios recientes retoman la clasificación mencionada y la amplían a cuatro sectores, de tal manera que se incluye al denominado Sector Extremo Oriental (Gómez-Tuena et al., 2007; Ferrari et al., 2012).

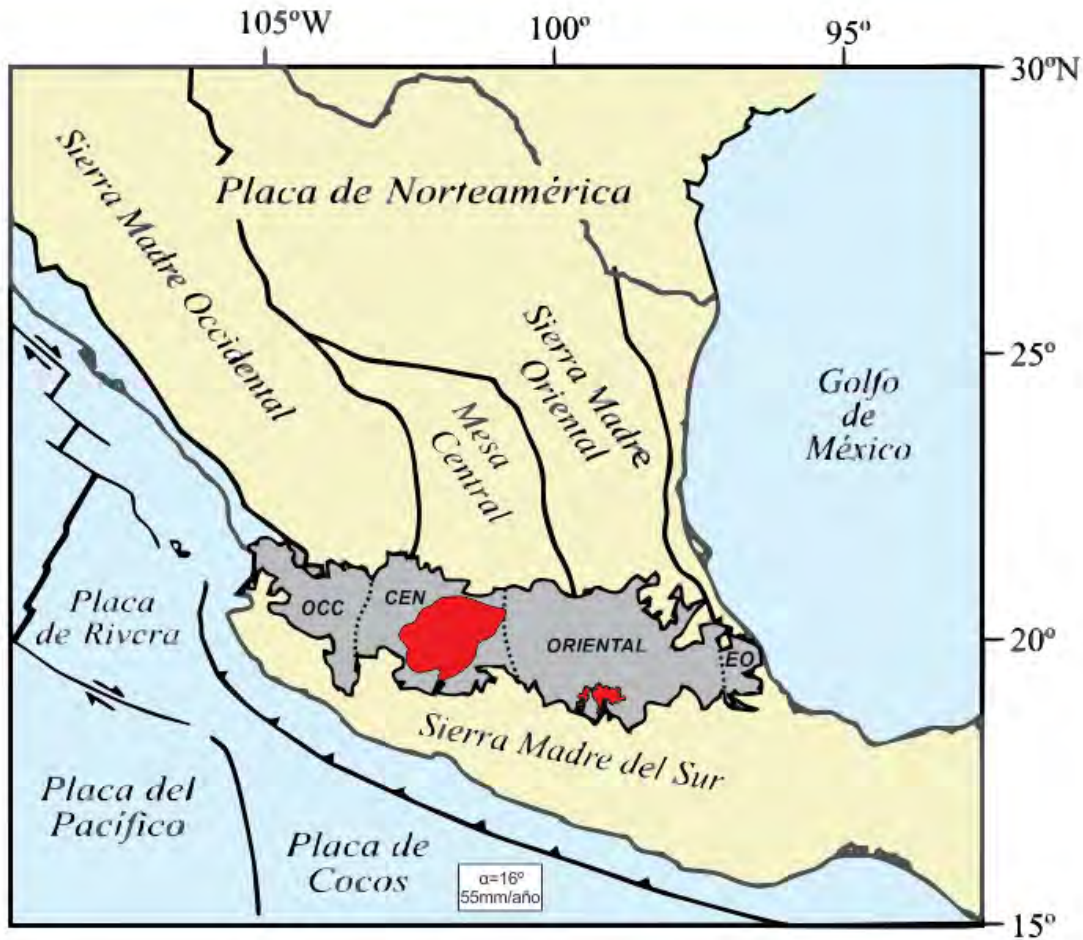


Figura 1.- Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM, gris) y sus cuatro sectores, el Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC) y el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) en rojo, en el sector oriental y central respectivamente, así como, la configuración de las placas tectónicas actuales y las principales provincias fisiográficas de México. OCC=Sector Occidental; CEN=Sector Central; EO=Sector Extremo Oriental. Modificado de Gómez-Tuena y colaboradores (2007a).

El Sector Occidental, se caracteriza por presentar un vulcanismo bimodal, formado por estratovolcanes y complejos de domos dacíticos-riolíticos como por centros monogenéticos basálticos; a su vez, el Sector Central se encuentra representado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltico-andesítica. Los estratovolcanes se encuentran ausentes salvo el Tancítaro; por su parte, el Sector Oriental presenta un vulcanismo emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición andesítica a riolítica. Los volcanes monogenéticos de composición basáltica representan solo una pequeña parte del volumen total; Por último, el Sector extremo Oriental está conformado por magmas con firmas alcalinas principalmente, así como una marcada ausencia de estratovolcanes. Cabe destacar que estos sectores se distribuyen con direcciones preferenciales de E-W para la porción Oriental y Central, así

como, WNW-ESE para la porción occidental (Demant, 1978; Pasquaré et al., 1988, Carmichael, 2002; Gómez-Tuena et al., 2007; Ferrari et al., 2012; Siebe et al., 2014).

La FVTM en todo su conjunto está constituida por aproximadamente ~8000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, comprendiendo un área de ~160,000 km², siendo considerada el arco volcánico activo desde el neógeno más grande en Norte América (Demant, 1978; Gómez-Tuena, 2007a, Ferrari et al., 2012), donde es posible observar una extensa variación geoquímica, presentándose magmas calco-alcalinos a alcalinos, de silícicos a máficos, en ocasiones coetáneos (Ferrari et al., 2012). Es a partir del Mioceno medio (~15 Ma) y tardío, cuando la FVTM comienza su individualización como entidad geológica distintiva, resultado de una rotación antihoraria del arco que forma a la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 1999) y continúa su desarrollo hasta nuestros días. Su historia geológica puede sintetizarse en 4 episodios principales: La instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno medio y tardío, un episodio máfico del Mioceno tardío, un episodio silícico de finales del Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno temprano, y la reinstauración de un arco de gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío. Es en este último episodio, dentro del sector oriental que se forma la Sierra de las Cruces (Mora-Álvarez et al., 1991; Osete et al., 2000) y algunos volcanes poligenéticos medianos pertenecientes al campo volcánico de Apan (García-Palomo et al., 2002) aproximadamente ~3.7 Ma, sin embargo, el vulcanismo en este sector es principalmente cuaternario; posteriormente se tiene el emplazamiento de los grandes estratovolcanes con edades menores a 1 Ma (Gómez-Tuena et al., 2007). Actualmente el vulcanismo en la sección central y oriental está asociado a la subducción de la placa oceánica de Cocos con respecto a la placa continental de Norte América, a su vez, el sector occidental se asocia a la subducción de la placa Rivera bajo la misma placa continental (Figura 1; Pardo y Suárez, 1993,1995).

La FVTM forma un ángulo de 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Figura 1), este ángulo hace que varíe la distancia que existe entre el arco volcánico y la trinchera, en donde se tienen distancias que van desde los 150 km en el sector occidental hasta más de 400 km en el sector oriental, esta oblicuidad es una característica de la FVTM, ya que en general estos arcos suelen emplazarse con una geometría paralela a las trincheras (Perfit y Davidson, 2000). La compleja configuración geométrica de la subducción de las placas

es responsable de que en el sector centro-oriental la placa de Cocos presente una subducción sub-horizontal cerca de la costa, para finalmente debajo de la FVTM cambiar a un ángulo casi vertical, mientras que en el sector occidental el ángulo de subducción promedio es mayor que en la porción central, producto de desgarros en la placa y la subducción oblicua (Pardo y Suárez, 1993, 1995; Dougherty et al., 2012; Dougherty y Clayton, 2014; Pérez-Campos et al., 2008). Estas características en están estrechamente relacionadas a la fragmentación de la placa de Farallón, cuando las crestas meso-oceánicas llegaron en proximidad con la zona de subducción de la placa de Norteamérica. Este proceso produjo una importante reorganización en la configuración de las crestas meso-oceánicas, además de generar cambios en la dirección y velocidad del vector de convergencia a lo largo del margen continental pacífico (Engebretson et al., 1985). Las reconstrucciones globales indican que la placa de Cocos comenzó a existir a los ~24 Ma por efecto de la fracturación de la placa Farallón que también dio origen a la placa de Nazca (Atwater, 1989). Aunque existen algunas divergencias sobre las edades absolutas de las placas y sus velocidades de convergencia, existe consenso en que la placa de Rivera es relativamente más joven. Las placas de Cocos y Rivera presentan edades del Neógeno a lo largo de la trinchera, en donde la placa de Rivera tiene una edad menor a los 13 Ma y velocidad de convergencia de 4-4.9 cm/año (Kostoglodov y Bandy, 1995), por su parte, la placa de Cocos presenta rangos de edades y velocidad que varían de 12.7-16 Ma y 4.7-6.7 cm/año, respectivamente (de Oeste a Este). Seguidamente, la placa continental presenta un espesor cortical variable en el transecto de la FVTM, teniendo su menor espesor al occidente y el mayor al centro-oriental, en donde se encuentra el CVSC. Estudios recientes como el proyecto MARS, MASE y VEOX, sumados al modelo gravimétrico de Urrutua-Fucugauchi y Flores Ruiz (1996) permiten visualizar dichas variaciones (Figura 2), teniendo los mayores espesores para el Valle de Toluca y México. Se vuelve evidente la complejidad tectónica existente, en donde para las diferentes distancias entre el arco volcánico y la trinchera, se registran profundidades de placa similares, las cuales pueden generar extensión en la superficie de la placa (Figura 3; Contreras, 2013), lo que permite la existencia de debilidades estructurales paralelas a la FVTM, que pueden funcionar como zonas de ascenso preferencial para los magmas más primitivos, asociados generalmente a los campos volcánicos monogenéticos y/o derrames fisúrales (e.g. Chichinautzin), que se han emplazado siguiendo un sistema de fallas E-W (Márquez et al., 1999c; García-Palomo et al., 2000; Siebe et al., 2004b).

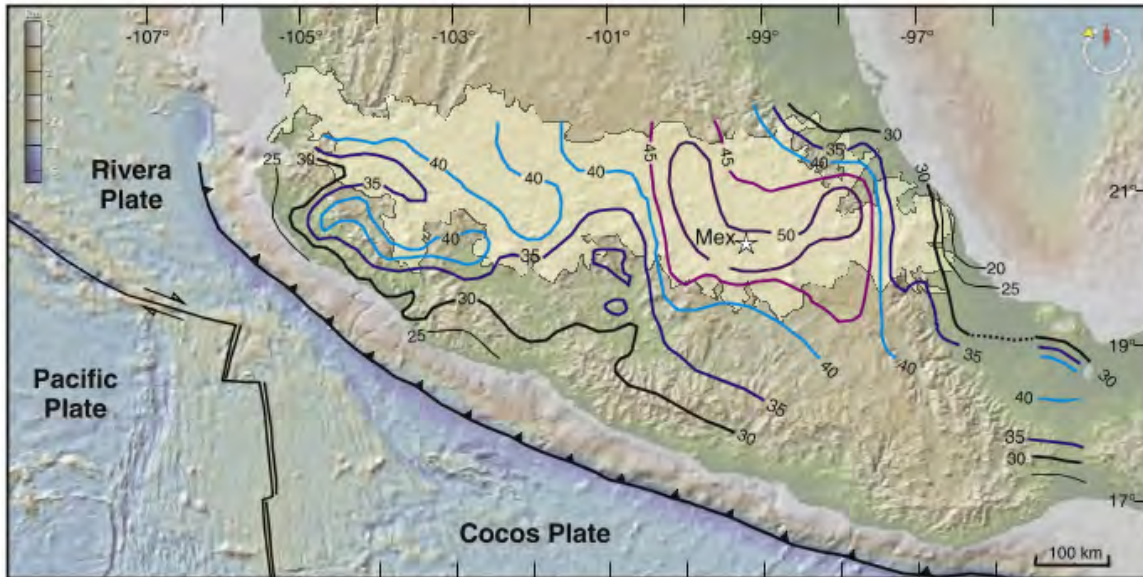


Figura 2.- Variaciones en el espesor cortical a lo largo de la FVTM. Tomado de Ferrari et al., 2012.

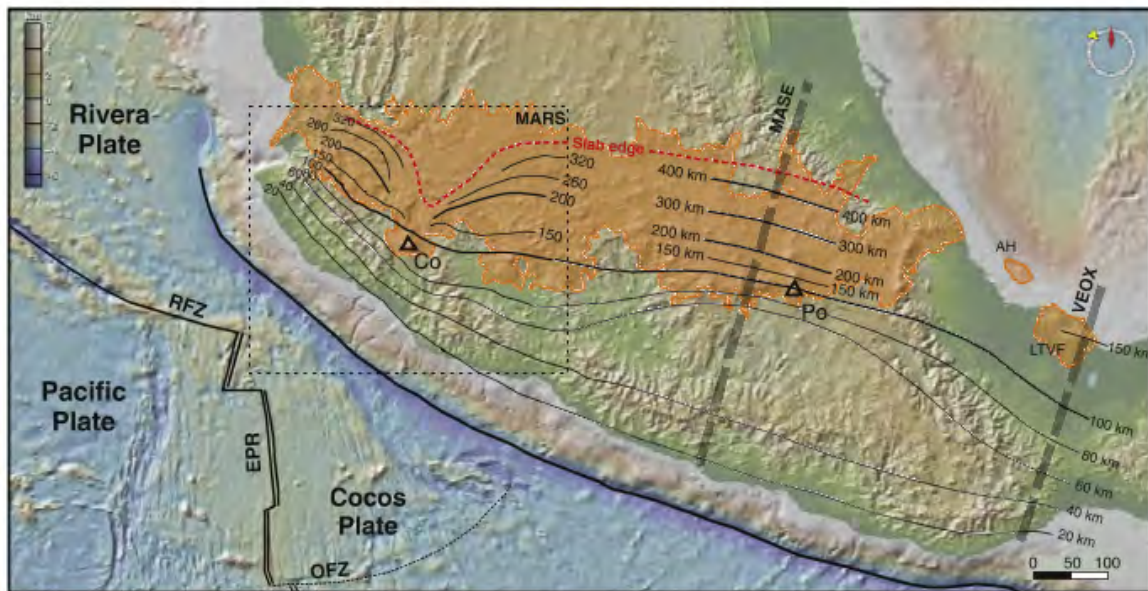


Figura 3.- Profundidad de subducción a la que se encuentra el slab; la línea negra muestra la profundidad de 100 km que coincide con el frente de la FVTM; los triángulos corresponden a los estratovolcanes: Co=Colima, Po=Popocatepetl. Tomado de Ferrari y colaboradores (2012).

La existencia de magmas alcalinos ha sido un problema para la establecer la petrogénesis de la FVTM, que han derivado en modelos que proponen que la subducción no es el principal mecanismo generador de magmas, y estableciendo que el magmatismo en la provincia fisiográfica es producto de un rift-pluma del manto (Márquez et al., 1999a) o que es consecuencia de un sistema de riff continental asociado a anomalías térmicas de la corteza (Verma, 2000a), sin embargo, las firmas típicas de subducción son las que

predominan en toda la FVTM, debido a esto, se considera a la subducción como el mecanismo generador predominante, además de estar ampliamente demostrado (Luhr, 1997; Ferrari et al., 1999; Wallace y Carmichael, 1999; Siebe et al., 2004b; Gómez-Tuena et al., 2007a; Arce et al., 2013). En el contexto geológico, diversos autores concuerdan en que la FVTM está emplazada sobre diversos terrenos tectonoestratigráficos (Figura 4), los cuales conforman al basamento. Hay que resaltar que cada terreno presenta una evolución geológica compleja y en la actualidad siguen estando a discusión características como sus límites tectónicos y composición.

Los datos de xenolitos y el análisis de muestras colectadas en perforaciones profundas nos indica que los magmas de la FVTM podrían estar influenciados por la asimilación de estas unidades corticales (Gómez-Tuena et al., 2007a). Atendiendo a los trabajos de Campa y Coney (1983) que proponen una división de terrenos tectonoestratigráficos para el territorio nacional, que fueron acrecionados a la placa de Norte América en distintos eventos geológicos, y que posteriormente se sofisticó mediante los trabajos de Sedlock et al., (1993) y Ortega-Gutiérrez et al., (1994). Se puede decir que el basamento de la FVTM es heterogéneo y está conformado por dos regiones que presentan edades y evoluciones diferentes. Subyaciendo a la mitad oriental existen terrenos con edad Precámbrica (>542 Ma) y Paleozoica (~542-251 Ma). El sector occidental está subyaciendo por el Terreno Guerrero que presenta una edad Triásico-Cretácica (251-65 Ma), y está conformado por arcos volcánicos marinos y depósitos sedimentarios. Cabe mencionar que el vulcanismo asociado a subducción ha sido ininterrumpido desde el Cretácico inferior (135 Ma); por su parte el sector extremo oriental no presentó un vulcanismo importante entre el Jurásico y el Mioceno medio (~165-15 Ma).

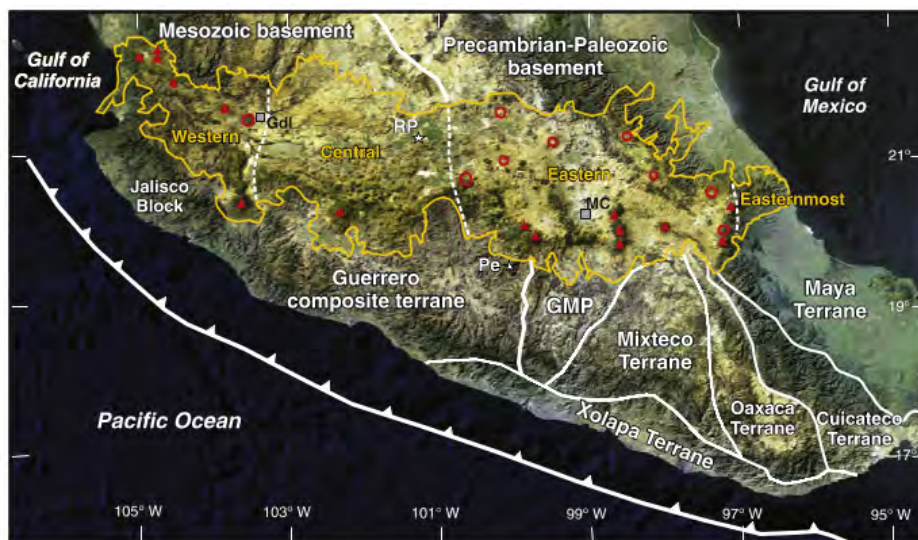


Figura 4.- Se muestran los diferentes terrenos tectonoestratigráficos sobre los cuales se emplaza la FTVM (amarillo). Los triángulos y círculos (rojos) representan los estratovolcanes y calderas más importantes respectivamente. Los cuadrados (grises) representan las ciudades México y Guadalajara (de este a oeste) como referencias. Tomado de Ferrari y colaboradores (2012).

1.4.2 EL CAMPO VOLCÁNICO SIERRA CHICHINAUTZIN (CVSC)

El CVSC se localiza dentro del Estado de México, Morelos y Ciudad de México (Figura 5), es un altiplano volcánico de lineamiento E-W, situado a una altitud promedio de 2240 msnm, que conforma la parte frontal del arco en el sector centro-oriental de la FVTM. Está delimitado al Este por la Sierra Nevada y al Oeste por el pie de monte del Volcán Nevado de Toluca, a su vez, divide a los valles de México al norte y al de Cuernavaca al Sur (Figura 6). Es un campo monogenético de edad principalmente cuaternaria, teniendo edades máximas de 1.2 Ma en sus estructuras más antiguas (Arce et al., 2013) y a su vez, se encuentra emplazado en un área aproximada de 2500 km², conformado por más de 221 volcanes, lo cual implica una de las tasas de concentración más altas en la FVTM que es de 0.1/km². Cabe destacar que la mayoría de las estructuras corresponde a conos de escoria con lavas asociadas; sin embargo, es difícil establecer un número total con entera certidumbre debido a que existen conos antiguos que han sido parcial y completamente sepultados por otros más jóvenes (Bloomfield, 1975; Martín del Pozzo, 1982; Márquez, 1999b).

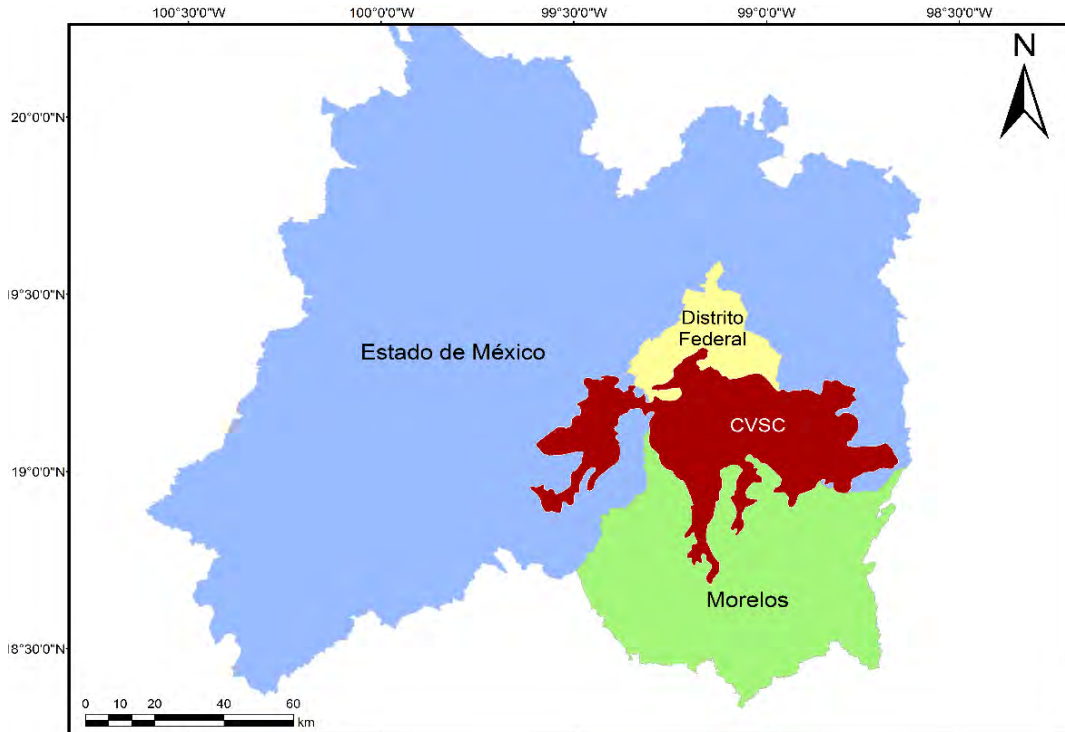


Figura 5.- Delimitación territorial de las entidades federativas dentro de la cuales se ubica el Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC).

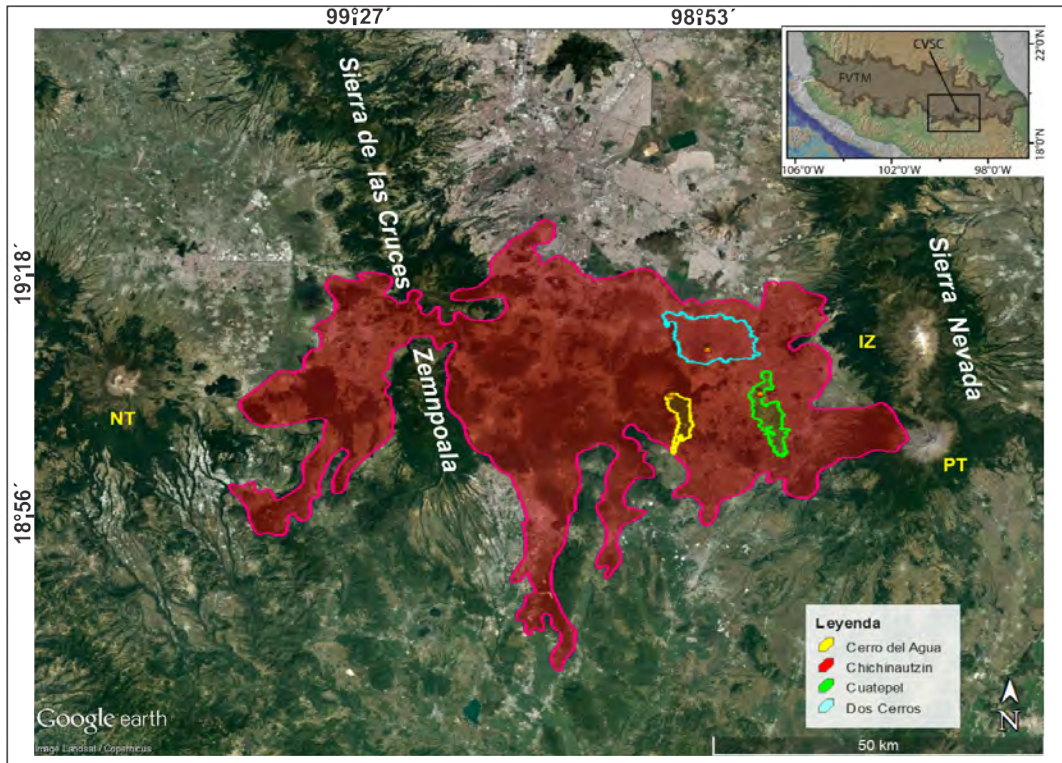


Figura 6.- Localización dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), del Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC, en rojo), Dos Cerros (azul), Cuatapel (verde), Cerro del Agua (amarillo); NT=Nevado de Toluca; PT=Popocatépetl; IZ=Iztacihuatl.

Los edificios del CVSC tienen pequeños volúmenes, pero en conjunto agrupan un volumen y área superior a los grandes estratovolcanes de la FVTM (Siebe et al., 2004a). Dichos edificios presentan en general una dirección preferencial E-W (Alaniz-Álvarez et al., 1998; Márquez et al., 1999b), aunque los últimos análisis estadísticos reportan más de dos lineamientos preferenciales (Le Corvec et al., 2013).

Existen varios cálculos de volumen para los productos emitidos en todo el CVSC, uno de ellos da una estimación mínima de 200 km^3 , con una tasa efusiva de $0.8 \text{ km}^3/1000$ años (Siebe et al., 2004a, b), sin embargo, los últimos fechamientos realizados por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dan edades desde 1.2 Ma, lo cual reduciría la tasa aproximadamente a la mitad, resultando una tasa de $0.47 \text{ km}^3/1000$ años (Arce et al., 2013). Estas estimaciones se tienen que tomar con precaución, debido a la falta de datos, pues si bien los últimos fechamientos reportados dan edades más antiguas, existen mediciones paleomagnéticas que indican (con base en el cron de Bruhnes) que el grueso de las rocas expuestas en el CVSC, tienen una edad menor a 0.73-0.79 Ma (Mooser et al., 1974; Herrero y Pal, 1978; Urrutia y Martin-Del Pozzo, 1993).

El vulcanismo asociado al CVSC es principalmente de afinidad calco-alcalina y se encuentra representado por andesitas, andesitas basálticas y dacitas principalmente (Bloomfield, 1975; Wallace y Carmichael, 1999; Gómez-Tuena et. al., 2007a), así como basaltos en mucho menor medida (Wallace y Carmichael, 1999). Cabe mencionar que han sido reportados basaltos que presentan una afinidad alcalina (Márquez et al., 1999a, b; Wallace y Carmichael, 1999; Siebe et al., 2004b) para los cuales existen diferentes modelos petrogenéticos; sin embargo, los mayores volúmenes de los productos corresponden a firmas típicas de subducción, con una afinidad calco-alcalina, siendo este mecanismo predominante y el más aceptado para la generación de magmas dentro del CVSC y la FVTM.

El CVSC presenta un basamento conformado por una secuencia calcárea con un espesor aproximado de ~ 3000 m, compuesto por calizas y dolomías clásticas marinas de edad Cretácica, que forman parte de la Plataforma Guerrero-Morelos (PGM). Debido a la evolución geológica y la tectónica activa, la PGM sufrió un plegamiento durante la Orogenia Laramide, que la desplazó 1000 m de su posición original. Sobreyaciendo a esta secuencia se encuentra el denominado Grupo Balsas, definido por depósitos continentales de lechos

rojos, evaporíticos, lacustres y volcanoclásticos, pertenecientes al Terciario inferior y medio (Fries, 1960, 1962). Durante el Oligoceno se registra un episodio volcánico, responsable del emplazamiento del Flujo Temixco; subsecuentemente, durante el Mioceno tardío ocurre el depósito de la Formación Tepoztlán, definida por una secuencia de depósitos laharicos volcanoclásticos, con una composición intermedia, y que alcanzan un espesor de 1000 m, además de una secuencia máfica, caracterizada por flujos de lava con una composición andesítico-basáltica (Ochoterena, 1978; Lenhardt et al., 2010, 2011a, 2011b). La evolución geológica culmina durante el Plioceno con el emplazamiento de las formaciones: Sierra de las Cruces y Cuernavaca (Mooser et al., 1974, Osete et al., 2000). Estas formaciones están constituidas por flujos de lava con una composición variable de andesítico a dacítico y flujos piroclásticos (Mora-Álvarez et al., 1991; Delgado-Granados y Martín del Pozzo, 1993, Osete et al., 2000). Cabe mencionar que ambas formaciones son coetáneas. Finalmente, es sobre estas últimas en la que se depositan los productos de CVSC (Gómez-Tuena et al., 2007a; Arce et al., 2013).

Las rocas que se encuentran dentro del CVSC, presentan una mineralogía definida por olivino y plagioclasa (generalmente) para las rocas más máficas, mientras que, las más evolucionadas se caracterizan por presentar piroxeno y hornblenda (Wallace y Carmichael, 1999).

1.4.3 EL VOLCÁN DOS CERROS Y VOLCANES ALEDAÑOS

El volcán Dos Cerros (Figura 6) se ubica en la porción nororiental del CVSC y es un complejo volcánico conformado por un extenso escudo de lava, constituido por tres flujos (Agustín-Flores et al., 2011), que han sepultado parcialmente dos edificios más antiguos (de este a oeste, Volcán Cuajomac y Volcán Ayaqueme), a su vez el escudo se encuentra coronado por dos conos de escoria: La Ninfa y El Tezpomayo (Figura 7), con una altitud de 3,000 msnm y 3,080 msnm respectivamente. Los conos presentan una morfología muy similar, lo que indica que pueden ser contemporáneos en su formación (Agustín-Flores et al., 2011); por su parte el escudo está compuesto por tres flujos de lava. Inicialmente, la formación del escudo se asocia a una fisura, siendo los primeros productos emplazados, una vez formado el escudo, la actividad se centró en los puntos formados por los conos de escoria y culminó con un flujo a través del Tezpomayo, siendo el último evento efusivo. El

tipo de actividad presente en Dos Cerros está caracterizada por emisiones efusivas y erupciones explosivas de tipo estromboliano; en cuanto a sus lavas, el volcán Dos Cerros presenta una composición andesítica a andesítica-basáltica, con una paragénesis mineral de olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno y plagioclasa (Agustín-Flores et al., 2011).

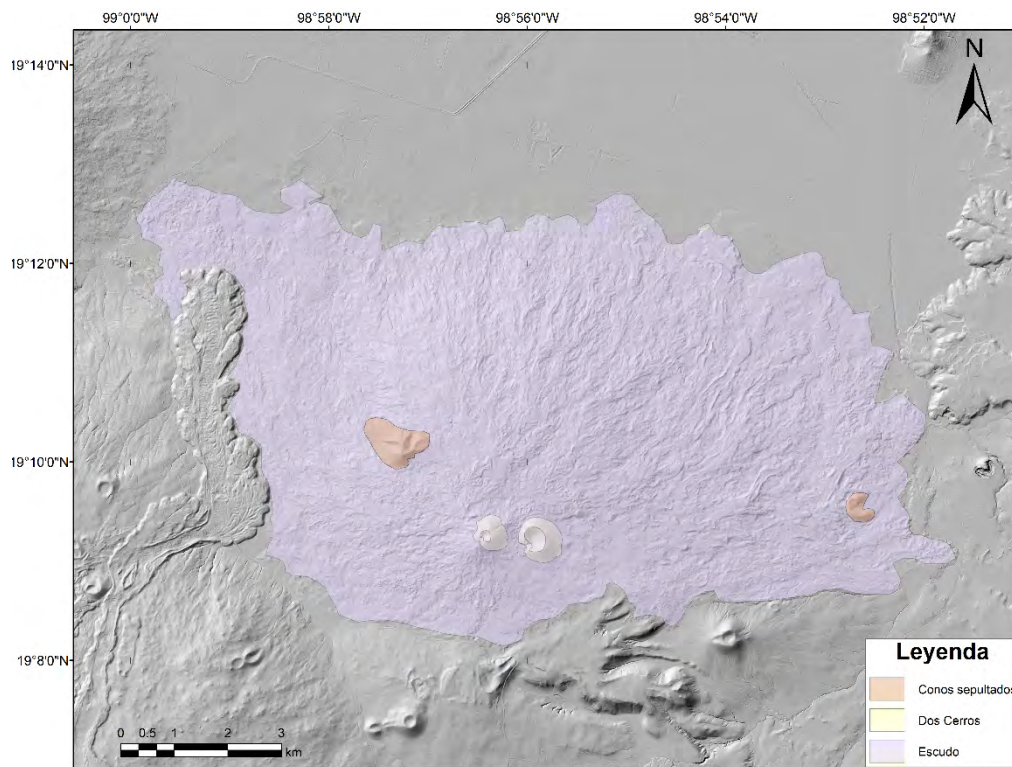


Figura 7.- Imagen de LIDAR que muestra el área cubierta por los flujos (escudo, morado) y los conos de escoria, de Este a Oeste se pueden observar La Ninfa y Tezpomayo (amarillo), así como Cuajomoc y Ayaqueme (naranja).

Agustín-Flores y colaboradores (2011) reportan que los flujos de lava cubren un área total de 80.3 km² y calcula un volumen de lava emitido mínimo de 1.2 km³, lo que hacen ser a este volcán particularmente grande para el campo. Es de mencionar que Dos Cerros se catalogó como el complejo volcánico más grande en todo el CVSC, y así lo fue hasta los estudios realizados por Lorenzo-Merino (2018) en el Volcán Pelado, que ahora ostenta dicho lugar. Estos tipos de volcanes conformados por extensos escudos de lavas son de mayor tamaño que los conos de escoria y menores a los estratovolcanes, han sido observados en diversos campos monogenéticos alrededor del planeta, incluyendo a todo lo largo de la FVTM (e.g., Hasenaka y Carmichael, 1985) y son particularmente jóvenes en el CVSC (por ejemplo: Chichinautzin, Pelado, Siebe et al., 2004a).

Williams y McBirney (1979) dan una definición formal para los volcanes escudo, a su vez Whitford-Stark (1975) formula una clasificación con base en la relación del diámetro basal y la altura, generando cuatro categorías, pero dicha clasificación no aplica para los volcanes escudo en los campos de México, debido a que no pertenecen exactamente a ninguna, es decir, que generan un amplio campo que engloba a 3 de las 4 categorías propuestas, sin que predomine alguna en específico. A su vez, Hasenaka (1994) se encontró con esta dificultad por lo que después de estudiarlos a detalle, decidió denominarlos “*Escudos Mexicanos*”. Estos volcanes escudo representan aproximadamente el 7% del total de las estructuras presentes en el CVSC, dentro de los cuales podemos encontrar, ordenados de Oeste a Este, a los volcanes Pelado, Chichinautzin, Cuauhtzin, Ocusacayo, Teuhtli, Tláloc, Cilcuayo y DC, siendo los más grandes e importantes.

Los trabajos previos realizados en el área reportan edades relativas para los volcanes Cerro del Agua, Pelagatos, Flujo Tlacotenco y Dos Cerros, utilizando el marcador estratigráfico correspondiente a los productos de caída de una erupción del Volcán Popocatepetl, la “*Pómez Tutti Frutti*” (TF) datada en 14,100 años A.P. (edad convencional; Siebe et al., 2005; Sosa-Ceballos et al., 2012); también se encuentran en la literatura algunos fechamientos por radiocarbono que presentan algunos inconvenientes mencionados a continuación, los cuales no permiten establecer una edad absoluta. Existe un fechamiento en fragmentos de carbón en paleosuelo para el Pelagatos, realizado en el paleosuelo que se encuentra directamente sobreyaciendo a los flujos de lava emitidos por el volcán, dando una edad de $2,520 \pm 105$ años A.P., de tal forma que solo se puede estimar una edad relativa de 14,100-2,520 años A.P. (Guilbaud et al. 2009, Agustín-Flores et al., 2011).

Para el caso de Dos Cerros se reportan un par de fechamientos en fragmentos de carbón obtenidos de las cenizas (Arana-Salinas, 2004; Agustín-Flores et al., 2011; Guilbaud, 2015), los cuales arrojan edades de $13,980 \pm 70$ y $13,695 \pm 110/-105$ años A.P., lo anterior es incongruente para la edad de TF y la relación estratigráfica existente con Dos Cerros (subyaciendo) que indica una edad mayor a 14,100 años A.P.

El volcán Cerro del Agua no se encontraba en mejor situación, Agustín-Flores y colaboradores (2011), establecieron relaciones estratigráficas con respecto a los volcanes

aledaños y concluyeron que, con base en que el edificio del Cerro del Agua y sus flujos se encuentran sobreyaciendo a los productos del Volcán Cilcuayo, y este a su vez subyace a la pómez Tutti Frutti, se obtiene una edad relativa para el Cilcuayo, la cual es mayor a 14,100 años A.P., cabe mencionar que Cerro del Agua presenta flujos emplazados al mismo nivel estratigráfico que el Pelagatos, delimitando su edad en el mismo rango que el Pelagatos; sin embargo Guilbaud y colaboradores (2015), han obtenido un fechamiento por radiocarbono recientemente, y reportan una edad absoluta de $10,845 \pm 290/280$ años. Por último, según Siebe et al. (2005), el Flujo Tlacotenco se encuentra emplazado sobreyaciendo a Dos Cerros y subyaciendo al volcán Tláloc, este último tiene una edad reportada de $6,200 \pm 85$ años A.P., lo cual da una edad del Flujo Tlacotenco en el rango de $14,100-6,200 \pm 85$ años A.P. Sin embargo, usando imágenes Lidar de alta precisión, Guilbaud y colaboradores (2015) claramente describen que el Flujo Tlacotenco recubre parte de las lavas del volcán Tláloc y entonces es más joven ($<6,200 \pm 85$ años A.P).

Estudios recientes realizados por Jaimes-Viera y colaboradores (2018), reportan cuatro dataciones por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, correspondientes a los volcanes Cuatempel ($33,932 \pm 5,000$), Aholo ($22,932 \pm 15,000$), Zitlaltepeltl ($34,392 \pm 4,000$), y Achichipilco ($33,392 \pm 6,000$). Los dos últimos no se encuentran dentro del área de estudio, localizándose al suroeste y sureste del volcán Huiztomayo, respectivamente. Además, dichos autores reportan datos químicos para los volcanes Cuatempel y Aholo (una muestra por volcán). Por su parte, Straub y colaboradores (2008) reportan un par de datos químicos para el volcán Cuatempel (dos muestras), mientras que Schaaf y colaboradores (2005), hacen lo propio para los volcanes Aholo y La Joya (una y dos muestras, respectivamente). Es necesario mencionar que, a reserva de estos datos, existen pocos análisis químicos, así como dataciones de los volcanes ubicados en la zona más al oriente del CVSC.

En resumen, se puede decir que los datos aportados por los trabajos previos (Tabla 1), son un primer esfuerzo para establecer la temporalidad de los eventos en la parte oriental del CVSC, pero que sin duda alguna necesita ampliarse y refinarse, para de esta manera poder establecer, no sólo amplios rangos de edades, sino lograr acotarlos más y/o establecer edades absolutas en el peor y mejor de los casos respectivamente. De igual manera, es de suma importancia incrementar el catálogo de datos químicos existente, con el fin de realizar comparaciones y diferenciar los productos, de tal forma que dichas caracterizaciones

permitan establecer e identificar las distintas fuentes de los productos presentes en dicho sector del campo.

Tabla 1.- Datos comparativos recogidos de la literatura existente de los volcanes dentro del área de estudio.

	Pelagatos	Cerro del Agua	Tlacotenco	Dos cerros	
				Tezomayo	La Ninfa
Composición (wt. % de SiO ₂)	52.5-57.5	54.1-56.7	62.85-64.05	55.1-59.5	
Edad convencional o relativa (años A.P.)	<14,000; >2,500	10,845 ± 290/280	<14,000; >6200	>14,100	
Altitud sobre el nivel del mar (m)	3,020	3,480	3450	3,080	3,000
Área cubierta por los flujos de lava (Km ²)	4.9	17.62	12.84	80.3	80.3
Volumen del cono (Km ³)	0.0017	0.028	NA	0.022	0.032
Volumen de los flujos de lava (Km ³)	0.036	0.24	0.26-0.39	1.2	1.2
Volumen total (Km ³)	0.038	0.27	0.26-0.39	1.25	1.25

CAPITULO 2: METODOLOGÍA

2.1 TRABAJO DE GABINETE

El trabajo de gabinete se realizó en tres etapas siendo la primera, la recopilación, análisis y uso de la bibliografía existente, para lo cual se consultaron libros, artículos, tesis, boletines especiales y cartas (topográficas y geológicas).

La segunda etapa consistió en la generación de mapas, la comparación e interpretación de datos geoquímicos y petrográficos, así como el procesamiento de datos estadísticos (todos los valores obtenidos fueron redondeados a un dígito decimal) y la generación de gráficas asociadas. El cálculo de áreas correspondiente a conos y lavas se realizó con el software ArcGIS Desktop® de ESRI® en su versión 10.3, seguidamente el volumen de las lavas se determinó mediante el producto de los cocientes “área” y “espesor promedio”, calculando el espesor promedio usando perfiles de elevación en el frente de los flujos. Para los conos, el volumen se calculó usando una aproximación de base plana. La elaboración de mapas se llevó a cabo a través del software ArcGIS Desktop® de ESRI® en su versión 10.3, para lo cual se utilizaron la carta topográfica “Amecameca de Juárez” (E14B41) y “Milpa Alta” (E14A49), además de imágenes de satélite de alta resolución, la base topográfica de Open Street Maps (OSM), e imágenes LIDAR (del inglés, Laser Imaging Detection and Ranging) con resolución horizontal de 5 metros obtenidas del portal web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI; E14B41, E14B41A, E14B41B, E14B41C, E14B41D, E14B41E, E14B41F). Se usaron también mapas de la parte más al oeste de la zona de estudios elaboradas por Siebe y colaboradores (2005), Agustín-Flores y colaboradores (2011), además de Guilbaud y colaboradores (2015). Por su parte, los datos petrográficos y estadísticos fueron procesados para la obtención de gráficos en la suite ofimática de Microsoft Office 2016® en su producto Excel®. Los datos geoquímicos fueron procesados en el software Igpets® (Igneous petrology software) de RockWare®.

La tercera etapa se conformó por el trabajo de edición de imágenes y redacción de la tesis. Algunas imágenes satelitales se obtuvieron a través de GeoMapApp© 3.6.8, Global Mapper® 15 y Google Earth Pro© y todas las imágenes se editaron en el software de diseño gráfico vectorial Corel Draw® X7. Asimismo, la redacción de este trabajo se llevó a cabo en el procesador de textos de la suite ofimática Microsoft Office 2016® en su producto Word®.

2.2 TRABAJO DE CAMPO

Las metodologías de campo empleadas en este trabajo consistieron en el levantamiento estratigráfico para conocer las relaciones espaciales y cronológicas existentes de los productos emitidos en toda el área y la recolección de muestras para su posterior análisis granulométrico, petrográfico, de componentes, químico y radiométrico.

El trabajo de campo tuvo una duración de 16 días, divididos en 4 expediciones realizadas durante el periodo 2015-2016, durante las cuales se establecieron 79 estaciones y se tomaron 104 muestras. El levantamiento estratigráfico consistió en descripciones detalladas, documentación fotográfica y elaboración de secciones para su posterior correlación. Se tomaron muestras representativas de acuerdo a las características presentes en los depósitos (espesor de las unidades, posición estratigráfica, consolidación, variación mineralógica y granulométrica, etcétera). Para las tefras se procuró obtener las muestras desde los depósitos más frescos y a diferentes niveles, para lo cual se excavaron trincheras. Para las bombas y las lavas, se procedió a descostrarlas *in situ* para eliminar partes alteradas. Asimismo, los paleosuelos fueron obtenidos de los primeros 2-3 cm por debajo del depósito volcánico, y en un caso se separaron fragmentos de carbón *in situ* presentes en la tefra.

Es importante señalar que el análisis estratigráfico permitió en un primer acercamiento, inferir edades relativas de los centros de emisión con respecto a la erupción pliniana del volcán Popocatepetl de 17,000 años A.P., conocida como erupción “Tutti Frutti” (Mooser, 1967; Siebe et al., 1997, 1999; Sosa-Ceballos et. al., 2012). Esta erupción produjo un depósito de pómez que es un excelente indicador estratigráfico dentro del área de estudio, ya que tiene una gran extensión geográfica y se identifica fácilmente en el campo, debido a que sus características contrastan con los depósitos de escoria abundantes en el área mencionada (descritos en el siguiente capítulo).

La pómez “Tutti Frutti” es un depósito fácilmente distinguible que fue descrito y fechado originalmente por Mooser (1967), a su vez, Siebe y colaboradores (1997,1999) realizaron estudios a detalle en los que identificaron y describieron tres unidades dentro de la secuencia (Grey Pumice, Milky Pumice y Tutti Frutti Pumice), con base en el color de los

fragmentos de pómez y la abundancia relativa de los xenolitos del basamento. Finalmente, Sosa-Ceballos y colaboradores (2012) refinan su edad y redefinen la secuencia como un depósito constituido por dos unidades principales: GT (Grey Tefra) y MT (Milky Tefra), con base en su composición, familias de minerales y sus componentes líticos. La unidad basal GT se caracteriza por su color gris, en intercalaciones de materiales finos y gruesos que presentan buena gradación y selección, a su vez, se encuentran capas ricas en líticos volcánicos y clastos de pómez gris. Por su parte, MT, la unidad superior, presenta pómez con una coloración blanca, gris y naranja, además de una gran cantidad de fragmentos líticos accidentales de color gris (granodiorita), verde pálido (limolita metamorfozada) y verde brillante (caliza metamorfozada), además de otros fragmentos del basamento. Cabe mencionar que dichos autores, a su vez, identifican dos unidades más dentro de la secuencia tipo, que corresponden a dos flujos piroclásticos, asimismo subdividen la unidad MT en pómez blanquecina y anaranjada (Figura 11). Es importante señalar que, dentro del área de este estudio, la unidad que se observó en la mayoría de las secuencias es MT, y solo en un sitio (Figura 15a, número 73) se encontró a las dos unidades mencionadas.

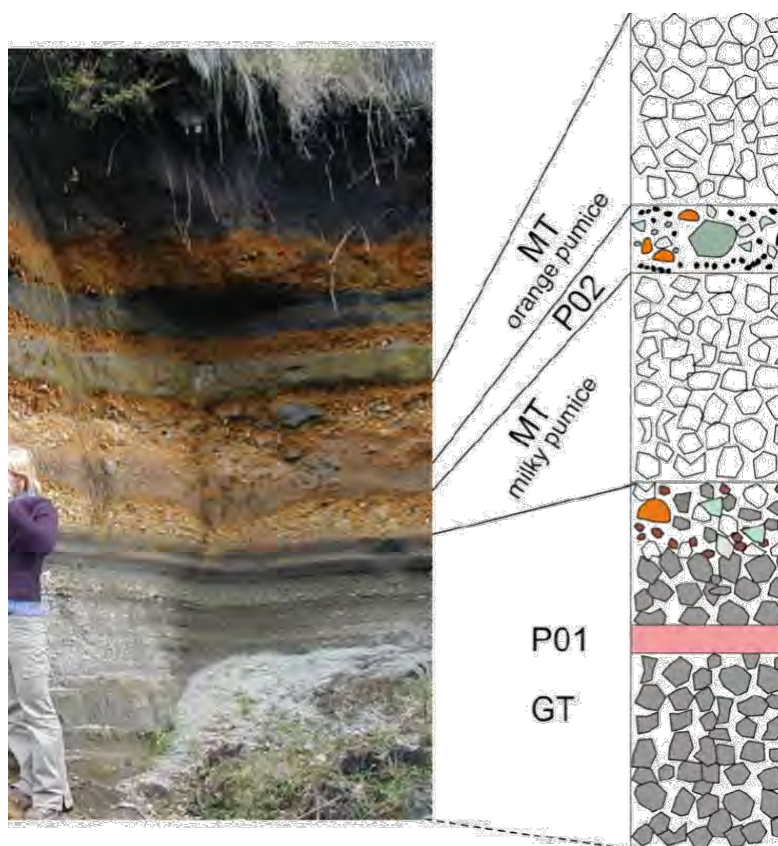


Figura 8.- Secuencia tipo de la Pomez Tutti Frutti. GT:Gray Tefra, MT:Milky Pumice, P01-Flujo piroclástico 01, P02- Flujo piroclástico 02. Tomado de Sosa-Ceballos et. al. (2012).



Figura 9.- Se observa la unidad MT del depósito conocido como pómez "Tutti Frutti", correspondiente a la erupción pliniana del volcán Popocatepetl de hace 17,000 años A.P., tal como aflora en el área de estudio. Nótese la gran cantidad de diferentes fragmentos que lo constituyen (pómez blanca a amarilla, líticos grises a verdosos), los cuales son muy distintos a los depósitos producidos por los volcanes monogenéticos en el área de estudio que constan principalmente de ceniza gris.

2.3 TRABAJO DE LABORATORIO

Las muestras recolectadas fueron procesadas según el análisis a realizar y se distribuyeron de la siguiente manera: 28 para dataciones de paleosuelo mediante ^{14}C , 55 para análisis químico de roca total y 59 para la elaboración de secciones pulidas en láminas delgadas.

El trabajo de laboratorio consistió, en primer lugar, del secado de todas las muestras, para ello se utilizó el Laboratorio de Sedimentología 2 del Instituto de Geofísica de la UNAM. Las muestras de lavas, bombas y tefras fueron secadas a 70 °C y los paleosuelos a 50°C durante

24 hrs. Posteriormente se realizó el tamizado mecánico a las tefras (solo a las no endurecidas) y se pesaron en una báscula de precisión, a su vez se separaron las fracciones por tamaños de partícula y se recalcularon a 100% de peso retenido; la separación de fracciones se realizó con tamices comprendidos entre -5ϕ y $+4\phi$, con un intervalo de 1ϕ , donde $\phi = -\log_2(d)$, siendo d la abertura del tamiz en mm (Tabla 2). Una vez realizada la separación, se tomó la cantidad necesaria de muestra para realizar secciones pulidas en el intervalo de 0ϕ a 2ϕ . De igual manera se tomaron fracciones en el rango de -3ϕ a 2ϕ , con el fin de realizar el análisis de componentes, para lo cual se utilizó una lupa con aumento de 10x y un microscopio binocular Nikon SMZ-2T con un aumento de 6.3x, lo anterior se llevó a cabo en la Sala de Microscopios del Departamento de Vulcanología, adscrito al Instituto de Geofísica de la UNAM.

N° tamiz	Malla (mm)	Malla (μm)	Phi ($-\log_2[d_{\text{mm}}]$)
1 1/4	31.5	32000	-5
5/8	16.0	16000	-4
5/16	8.0	8000	-3
5	4.0	4000	-2
10	2.0	2000	-1
18	1.0	1000	0
35	0.50	500	1
60	0.3	250	2
120	0.1	125	3
230	0.063	63	4
>230			>4

Tabla 2.- Se muestra los diferentes tamices utilizados y sus equivalencias.

La elaboración de secciones pulidas en lámina delgada se realizó con el fin de utilizar la técnica determinativa de microscopía de luz transmitida, para poder identificar las diferentes fases minerales presentes y realizar una descripción petrográfica a detalle. Para la obtención de las láminas delgadas se recurrió a los servicios de la empresa *Mann Petrographics* con sede en Arizona (taller comercial especializado), cabe mencionar que las muestras que así lo requirieron fueron tratadas con resina epoxi previo al corte y pulido. Una vez que se tuvieron las láminas, se procedió a realizar el análisis petrográfico, para lo cual se requirió del uso de un microscopio petrográfico Olympus® modelo BH-2, con

objetivos de 4x a 40x, asimismo se acoplo a este microscopio un contador automático SWIFT® modelo F, para el análisis mineralógico modal realizando un conteo de 1000 puntos por lamina. Las microfotografías fueron obtenidas a través del microscopio petrográfico Leyca® modelo DHLP mediante software de captura de imágenes IM50®. Todo lo anterior se realizó en la Sala de Microscopios perteneciente al Departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica, UNAM.

En el caso de los análisis químicos de elementos mayores y traza, se recurrió a los servicios de *Activation Laboratories LTD* con sede en Ancaster, Canadá. Las técnicas empleadas en el análisis fueron la espectrometría de emisión de plasma de acoplamiento inductivo por fusión (Fus-ICP) y digestión total (TD-ICP), así como espectrometría de masas por fusión (FUS-MS). El tratamiento de las muestras requiere la pulverización con aditamentos de acero templado, las cuales contaminan con Fe (0.1%). Para las técnicas de Fus-ICP y TD-ICP, el tratamiento requiere una fusión de metaborato/tetraborato de litio y una mezcla de cuatro ácidos (hidroclorhídrico, nítrico, perclórico e hidrofúorhídrico), por su parte las incertidumbres analíticas corresponden a $\pm 100\%$ al límite de detección, $\pm 15\text{-}20\%$ a 20 veces el límite de detección y mejor que $\pm 5\%$ a 100 veces el límite de detección respectivamente. Los detalles específicos de las técnicas de laboratorio empleadas en los análisis mencionados pueden consultarse en el sitio web www.actlabs.com. Posteriormente, los datos fueron recalculados a base anhidra, toda vez que el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ fue convertido a $\text{FeO}(\text{T})$ utilizando el factor de conversión propuesto por Irvine y Baragar (1971), que estipula que $\text{FeO}(\text{T}) = 0.8998 \times \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$.

Las dataciones por ^{14}C se realizaron en muestras con material orgánico principalmente en paleosuelos y fragmentos de carbón en depósitos piroclásticos de caída, para lo cual, se utilizaron los servicios del laboratorio Beta Analytic Inc. con sede en Miami, Florida. Las mediciones se realizaron mediante un espectrómetro de aceleración de masa (AMS) y calibradas mediante INTCAL13 con el método de rango y densidad de alta probabilidad (HDP; Reimer et al., 2013; Bronk-Ramsey, 2009). Las tablas de datos de edades que se muestran en el siguiente capítulo, incorporan edades convencionales y calibradas, sin embargo, cabe aclarar que las que se utilizan en estudio son las calibradas a 2 sigma, que posteriormente fueron promediadas y redondeadas.

CAPITULO III: RESULTADOS

3.1 CARTOGRÁFIA

El área de estudio (19° 0' y 19° 13' latitud Norte, y 99° 4' y 98° 46' longitud Oeste) se encuentra dentro de las cartas topográficas 1: 50,000 E14A49 (Milpa Alta) y E14B41 (Amecameca de Juárez) del INEGI y representa una superficie total de 850 km² (Figura 10). Cabe mencionar que el borde del mapa no coincide exactamente con el borde extremo del CVSC ya que este último no está cubierto por las imágenes Lidar. En el mapa realizado identificamos 71 edificios volcánicos, cuyas edades relativas fueron acertadas por correlaciones estratigráficas y, para los más recientes, por el fechamiento de paleosuelos ubicados justo debajo de sus tefras mediante ¹⁴C (ver más adelante). Los volcanes Dos Cerros, Cerro del Agua y Cuatempel (morado, rojo y azul, respectivamente en Figura 13) se identifican como los volcanes más recientes en la zona (a excepción del pelagatos), que se componen de flujos de lava asociados a conos de escoria. Seguidamente, se calcularon las áreas y volúmenes de los flujos de lavas y conos de dichas erupciones.

Los flujos de lava del volcán Dos Cerros están asociados a dos conos de escoria: la Ninfa y el Tezpomayo. El cono la Ninfa presenta una altura de 123 m y un diámetro basal de 856 m, con un área 0.5 km² y volumen de 0.05 km³, mientras que el cono Tezpomayo tiene una altura de 102 m y un diámetro basal de 640 m, con un área de 0.3 km² y un volumen de 0.04 km³. Las lavas cubren un área de 83.9 km² y presentan un volumen de 3.4 km³ (para un espesor promedio de 40 m). Seguidamente, los flujos de Cuatempel están asociados a un solo cono de escoria, que mide 192 m de alto y 1,070 m de diámetro, con un área de 0.8 km² y volumen de 0.08 km³, a su vez, las lavas cubren un área de 33.8 km² y corresponden a un volumen de 0.7 km³ (para un espesor promedio de 20 m). Para el caso de Cerro del Agua, los flujos de lavas se asocian a un cono con dimensiones de 183 m de alto y 894 m de diámetro, con un área de 0.5 km² y un volumen de 0.08 km³. A su vez, los flujos cubren un área de 18.2 km² y tienen un volumen de 0.32 km³ (para un espesor promedio de 17 m). Cabe mencionar que tanto el cono de Cuatempel como el de Cerro del Agua, presentan dos cráteres internos.

Las imágenes LIDAR (Figura 10a) ponen en evidencia diferencias en la rugosidad del terreno en el área. De los tres volcanes mencionados previamente, las lavas que presentan la menor rugosidad en el MDT, así como el mayor desarrollo en el encaje del drenaje, son

las del volcán Cuatapel, mientras que las lavas del volcán Cerro de Agua son las que presentan una mayor rugosidad y menor desarrollo en el encaje del drenaje. Por su parte, se observan claras diferencias morfológicas en los flujos de lava. Para el caso de los volcanes Cuatapel y Cerro del Agua, se identifica una tendencia predominante en la dirección de los flujos hacia el S-SE con una forma alargada, mientras que los flujos de lavas del volcán Dos Cerros presentan una morfología semicircular con una tendencia preferencial de dirección de los flujos hacia el norte (Figura 10a).

El mapa hipsográfico (Figura 10b) permite observar la variación altitudinal dentro del área de estudio, la cual presenta una tendencia predominante de disminución en la altitud desde el oeste hacia el este. Además, el terreno cambia de altamente irregular (accidentado) en el oeste a plano en el área circundante a la localidad de Amecameca en el este. A su vez, la altitud máxima se encuentra en el volcán Tláloc con 3,694 m.s.n.m., mientras que la menor presenta un valor de 1,824 m.s.n.m., al suroeste del área de estudio, al punto más al sur de los flujos de lava de Cerro del Agua (Figura 10b).

La imagen satelital (Figura 10c) presenta diferencias evidentes en la cubierta de vegetación existente. En el caso de Cerro del Agua, existe una abundante cobertura forestal sobre sus flujos, mientras que, para Dos Cerros, solamente el flujo que se extiende desde el cono Tezpomayo con una dirección oeste presenta un bosque denso. El resto del escudo presenta una menor cobertura forestal e incluso existen zonas de cultivos. En el caso de Cuatapel, la cubierta forestal es casi inexistente, y sus flujos de lava se encuentran principalmente cubiertos por zonas de cultivo. Por último y de manera ilustrativa, se presentan panorámicas en donde se muestran algunos volcanes del sector, específicamente los volcanes escudo Chinconquiá, Dos Cerros, Cilcuayo, Tláloc, y Joyacan, así como el conjunto de volcanes Huiztomayo, Loreto y Escobeta (HLE) que forman un escudo (Figura 11a,b). Los volcanes escudo HLE y Chinconquiá son los que presentan una topografía menos accidentada y formas semicirculares bien definidas, en comparación con los volcanes Joyacan, Dos Cerros y Tláloc, que presentan una mayor rugosidad y formas menos circulares.

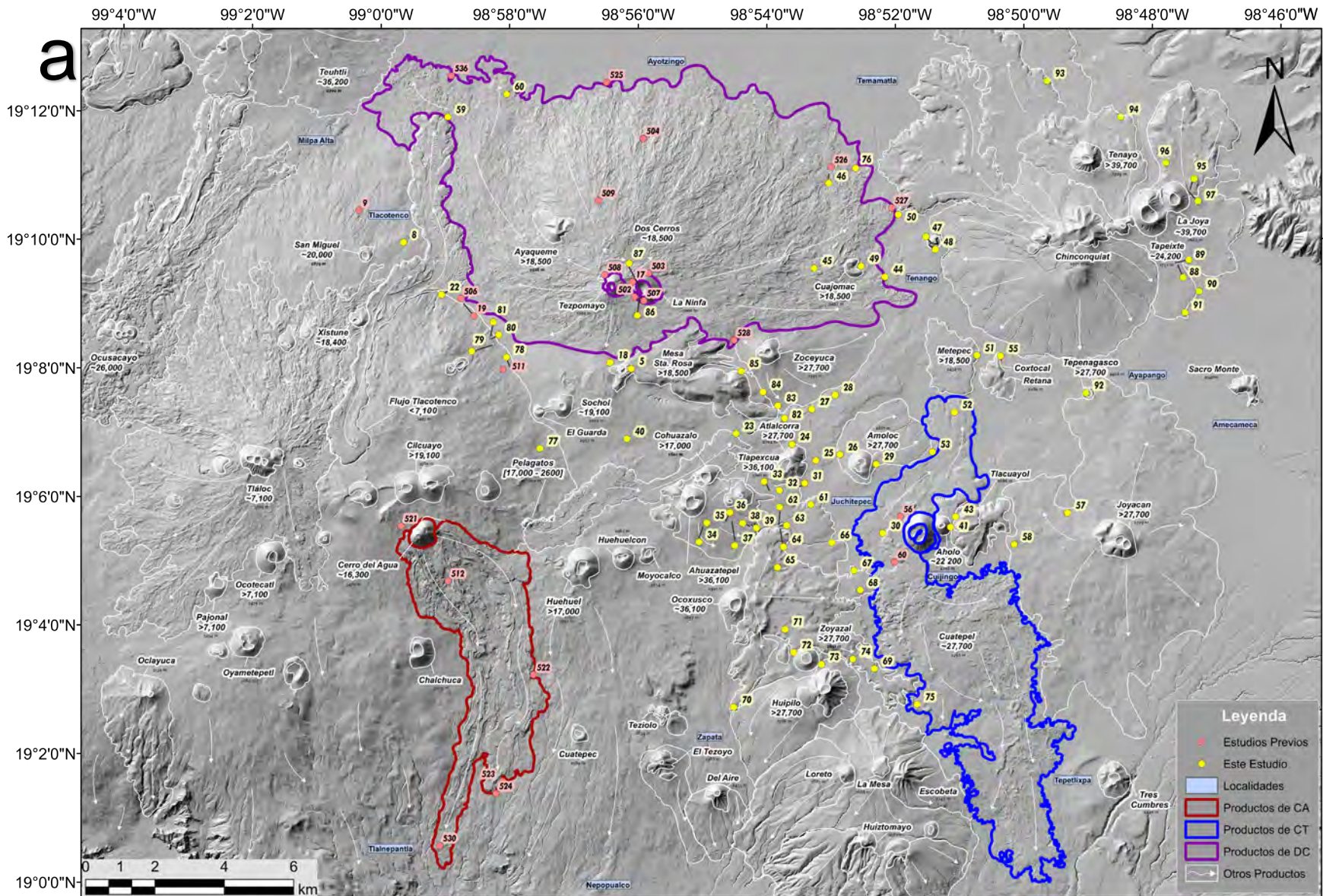


Figura 10a.- Mapa del área de estudio basado en imágenes LIDAR. Se muestran los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA = Cerro del Agua, CT = Cuatempel y DC = Dos Cerros.

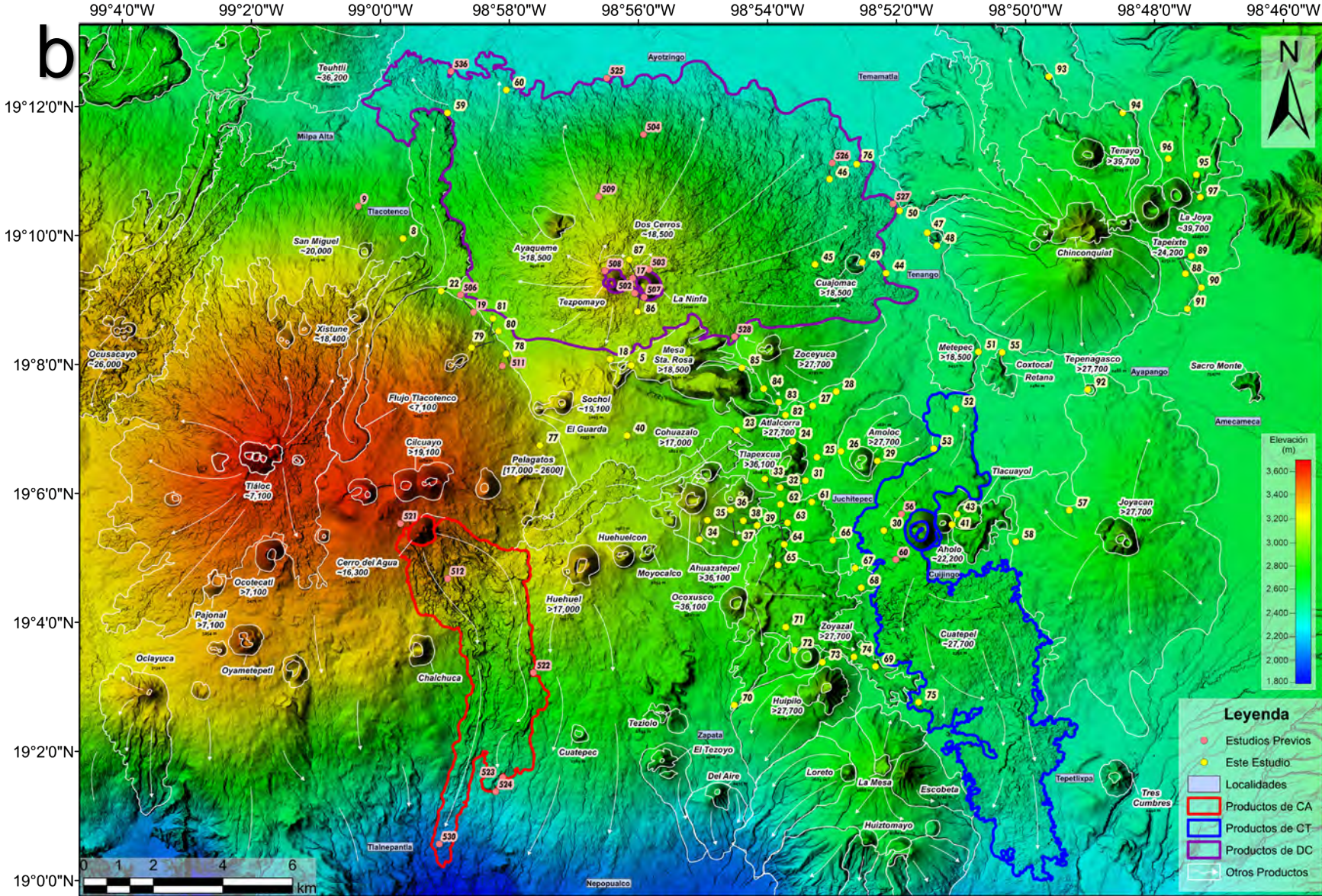


Figura 10b.- Mapa del área de estudio basado en imágenes LIDAR. Se muestran las diferencias en elevaciones, los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA = Cerro del Agua, CT = Cuatepel y DC = Dos Cerros.

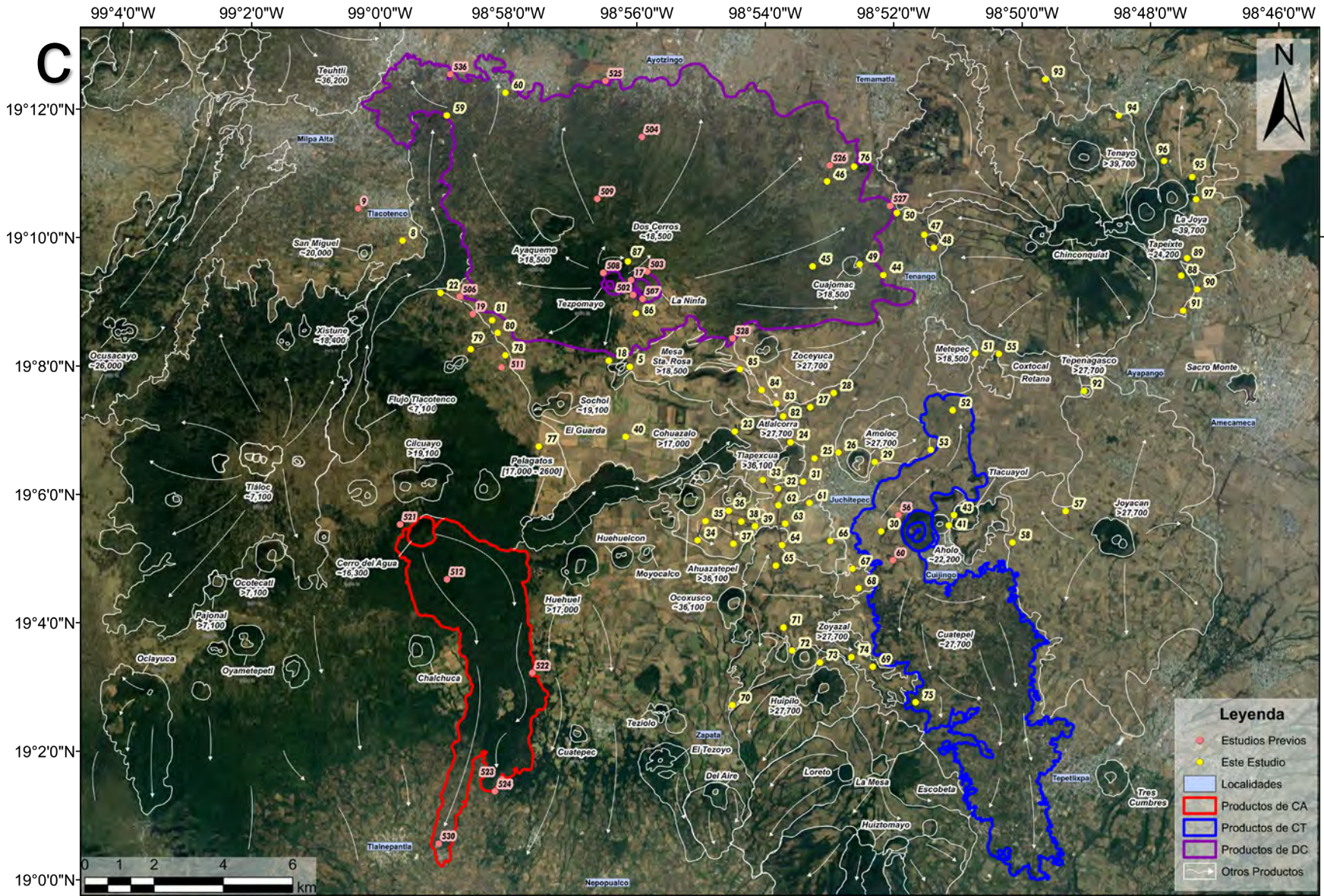


Figura 10c.- Mapa del área de estudio basado en imágenes satelitales. Se muestran, los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA = Cerro del Agua, CT = Cuatepel y DC = Dos Cerros.

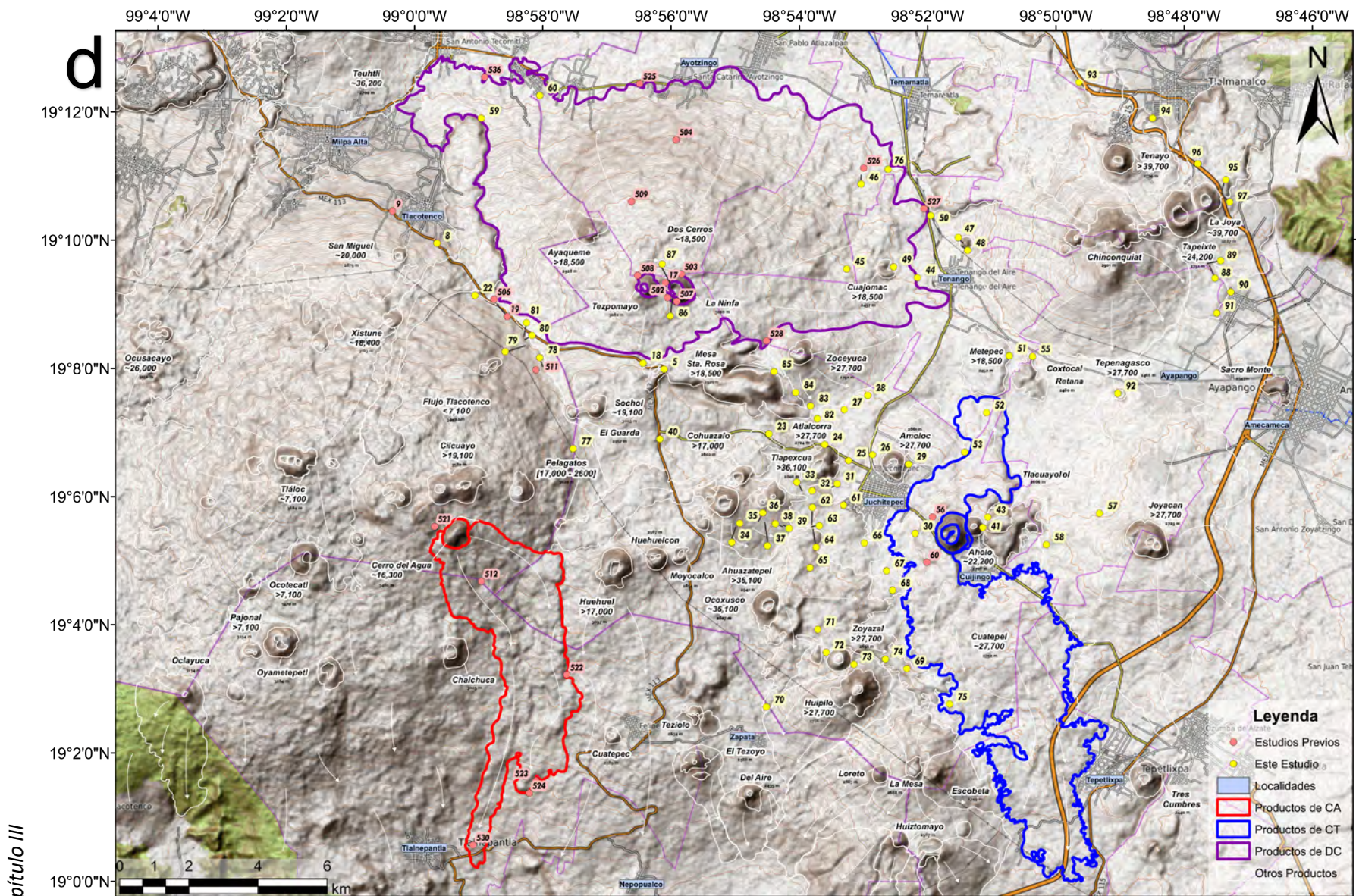


Figura 10d.- Mapa del área de estudio basado en OMS. Se muestran, los nombres, edades (estratigráficas y dataciones por ^{14}C), puntos de muestreo (previos y de este estudio), así como la delimitación de los flujos de lava y los conos de escoria. Los datos presentes corresponden a Siebe y colaboradores, (2005); Agustín-Flores y colaboradores, (2011); Guilbaud y colaboradores, (2009, 2015); y los propios de este estudio. CA = Cerro del Agua, CT = Cuatempel y DC = Dos Cerros.

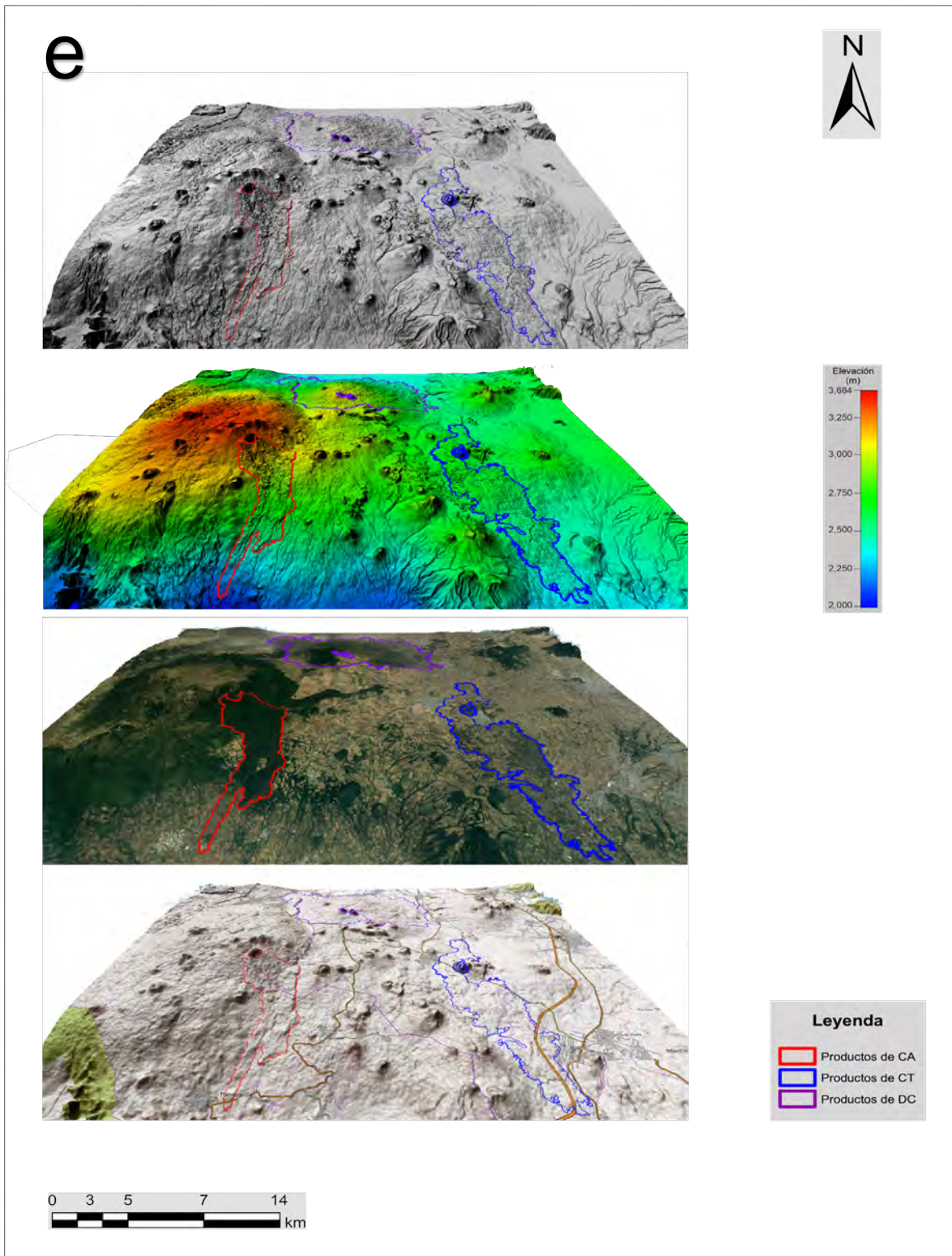


Figura 10e.- Se muestran los mapas anteriores con una perspectiva en 3d del área de estudio, donde es posible observar los flujos de lava y conos de escoria asociadas a las tres erupciones estudiadas. CA = Cerro del Agua, CT = Cuatepel y DC = Dos Cerros.

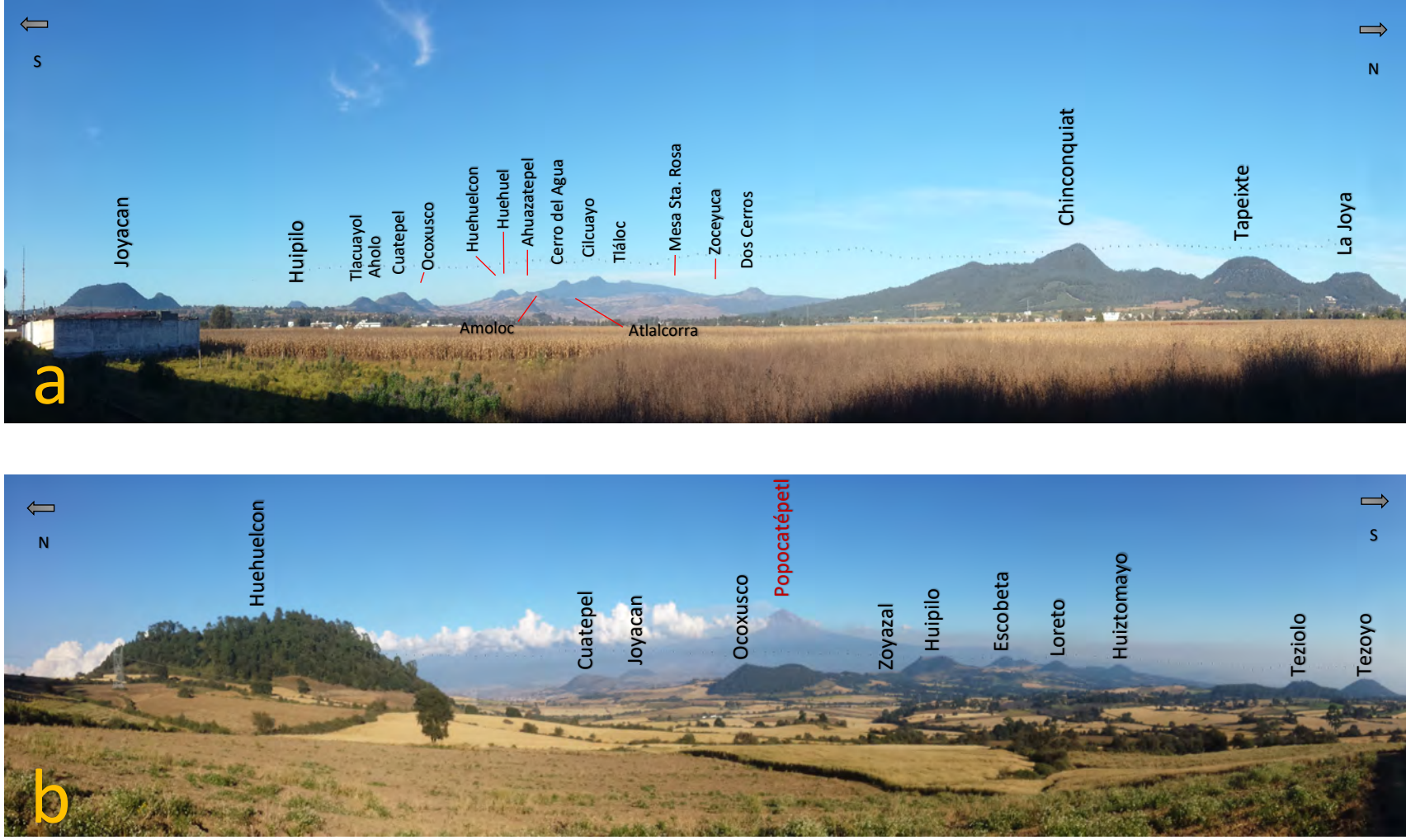


Figura 11.- Se muestran algunos volcanes dentro del área de estudio. a) Sección N-S, tomada en dirección Oeste, desde la carretera federal 115 México-Cuatla. b) Sección S-N, tomada en dirección Este, desde las inmediaciones del volcán Huehuel.

3.2 DEPÓSITOS DE CENIZA: DESCRIPCIÓN, RELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y DISTRIBUCIÓN

El área de estudio está conformada principalmente por secuencias de lavas y depósitos de tefra intercaladas con espesores importantes de suelos con diferentes grados de desarrollo y en algunos casos, material retrabajado (Figura 15a,b,c).

En el caso de los volcanes más recientes de la zona, el indicador estratigráfico Pómez Tutti Frutti (TF) se encuentra sobreyaciendo los depósitos del volcán Dos Cerros, que a su vez se encuentran estratigráficamente por encima de los propios del volcán Cuatepel, por lo cual dichas erupciones son más antiguas que 17,000 años A.P. Al contrario, los depósitos del volcán Cerro del Agua sobreyacen a dicho horizonte de pómez, por lo cual es más joven que la erupción mencionada. Esto permite clasificar en una primera instancia a los volcanes Dos Cerros y Cuatepel como pre-Tutti Frutti (>17,000 años A.P.), y al volcán Cerro del Agua como post-Tutti Frutti (<17,000 años A.P.).

Las tefras de los volcanes Dos Cerros, Cerro del Agua y Cuatepel presentan características macroscópicas que permiten su identificación en campo y son un primer acercamiento para su reconocimiento. Sin embargo, es necesario mencionar que los datos químicos y petrográficos presentados a continuación (ver más adelante en 3.5), además de las dataciones, permitieron corroborar tales hipótesis y definir, en la mayoría de los casos, el origen de los productos descritos durante las campañas en campo.

Los depósitos piroclásticos de caída del volcán Dos Cerros se presentan en campo, como una secuencia monótona de capas de ceniza poco endurecidas con un color gris y un tamaño de grano homogéneo (Figura 12a,b). Se compone de fragmentos grises densos, así como una pequeña proporción de fragmentos con coloración rojiza que son fácilmente distinguibles. Además, contiene abundantes fragmentos de cristales de tamaño milimétrico, translucidos blanquecinos y otros de color verde, sin variaciones notables en el tipo y proporción relativa de los cristales dentro de la secuencia (ver datos modales más adelante en 3.4).

Por su parte, el volcán Cuatepel presenta una mayor complejidad dentro de la secuencia de sus depósitos de caída, que está caracterizada por variaciones importantes en el tamaño

de grano de la base a la cima, como puede observarse en la columna proximal (Figura 13a,b). Horizontes deleznales de lapilli con algunos fragmentos de color gris claro y pardo, están intercalados con capas de lapilli a ceniza que presentan mejor selección y menor tamaño de grano. Estas últimas, se encuentran de parcialmente endurecidas a totalmente endurecidas, y son de color gris claro a marrón, respectivamente. Las capas basales contienen cristales de tamaño milimétrico de color verde oscuro, así como algunos blancos translucidos. El contenido en cristales disminuye hacia la parte alta de la secuencia, así como la vesicularidad y el tamaño de clastos.

A su vez, la secuencia característica de tefras del volcán Cerro del Agua presenta intercalaciones de capas de lapilli de color gris con capas de ceniza con tonalidades de gris más claro a marrón, estas últimas se encuentran parcialmente endurecidas. (Figura 14). Esta secuencia presenta una disminución sistemática en el tamaño de los clastos y vesicularidad de la base a la cima, de tal manera que las capas de ceniza predominan en la parte superior de la secuencia, mientras que el espesor de los horizontes de lapilli disminuye progresivamente hacia la parte alta. Una particularidad de estos depósitos de caída es la poca cantidad de fragmentos de cristal visibles, a diferencia de lo que caracteriza los productos de los volcanes Dos Cerros y Cuatempel.



Figura 12.- Se muestra el depósito piroclástico de caída correspondiente al volcán Dos Cerros. Nótese la homogeneidad que presenta la secuencia en el tamaño de grano. A. Sección proximal (2.3 km del cono); B. Sección distal (7.7 km del cono).

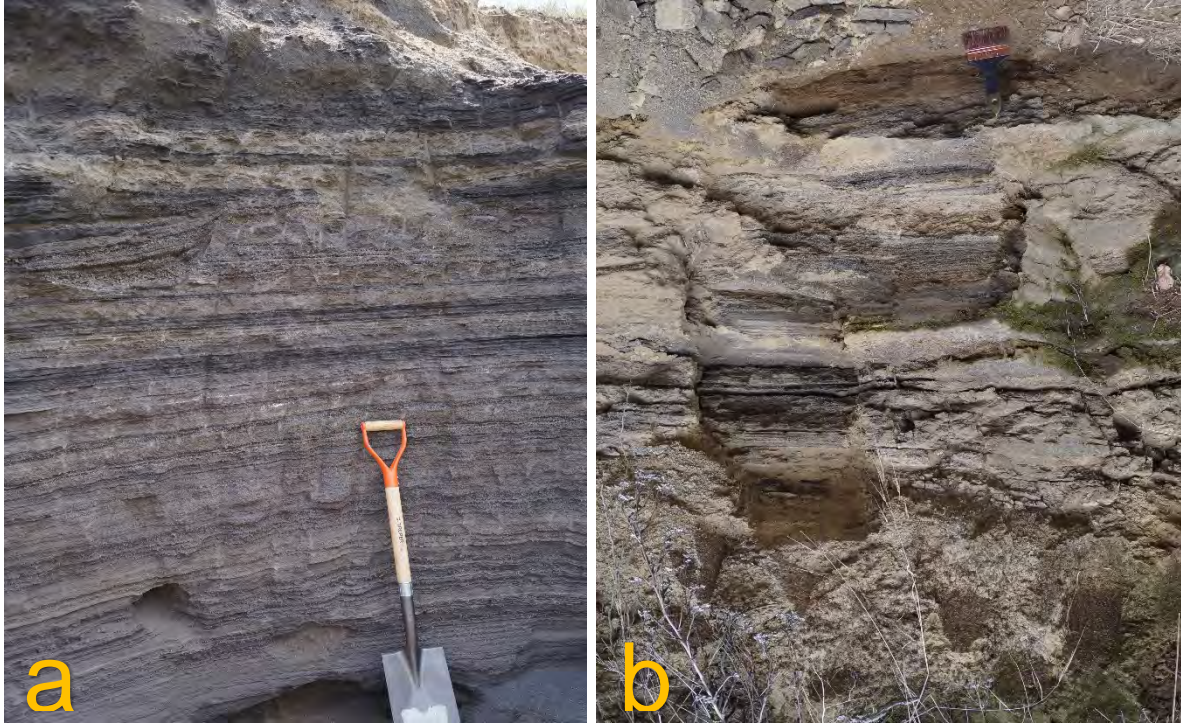


Figura 13.- Se muestra el depósito de caída correspondiente al volcán Cuatapel. Nótese las capas endurecidas de color marrón y los cambios en el tamaño del espesor. A. Sección proximal (2.3 km del cono); B. Sección distal (5.5 km del cono)

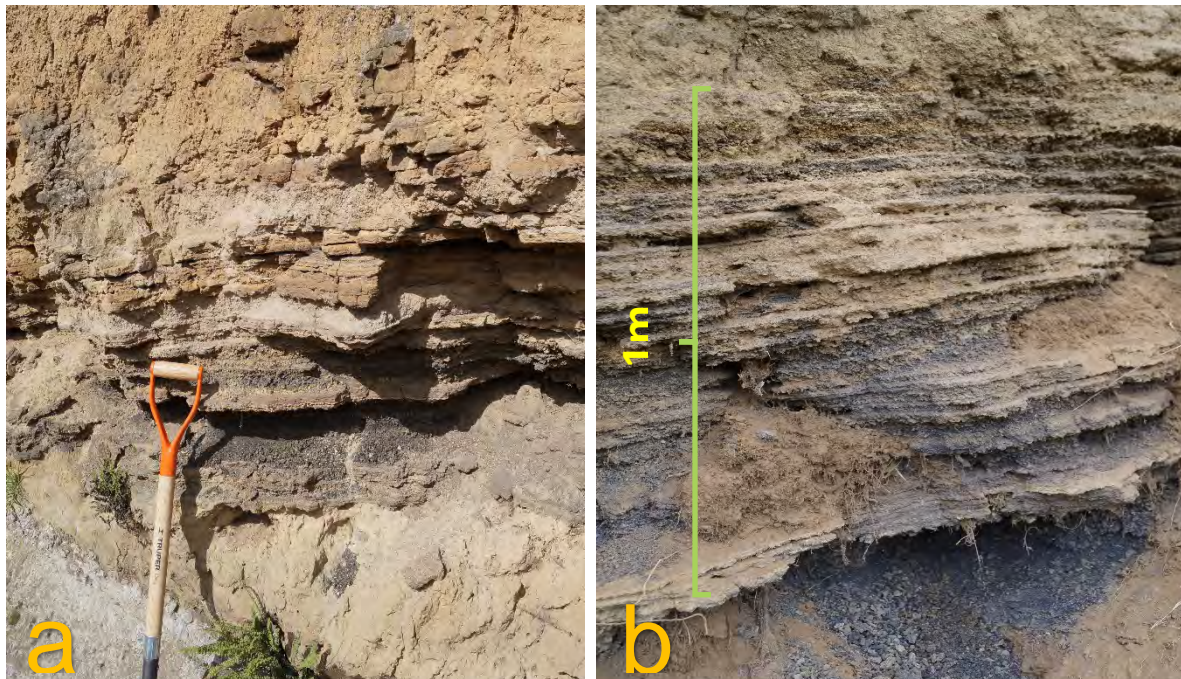


Figura 14.- Se muestra el depósito de caída correspondiente al volcán Cerro del Agua. Nótese las capas endurecidas de color marrón, así como los cambios en el tamaño de grano correspondiente a las capas grises deleznales. A. Sección proximal (6.7 km del cono); B. Sección medial (7.7 km del cono).

Los depósitos piroclásticos de caída asociados al volcán Dos Cerros presentan un eje de dispersión principal hacia el sureste, y se observaron hasta una distancia de 12.1 km del volcán en esta dirección donde tienen un espesor de 5 cm (MMA-73, Figura 15a). El espesor máximo observado (> 5 m) se localiza en el punto MMA-18, a una distancia de 2.6 km en dirección sur. El sitio con el espesor mínimo (4 cm) se encuentra a una distancia de 10.8 km al sureste del volcán (MMA-68, Figura 15a).

Por su parte, los depósitos piroclásticos de caída del volcán Cuatapel presentan un eje de dispersión principal con dirección suroeste y se identificaron hasta una distancia de 7.1 km en esta dirección donde tienen un espesor de 24 cm (MMA-70, Figura 15b). El espesor máximo (>3 m) corresponde al punto MMA-53 que se encuentra a una distancia de 2.4 km del volcán en dirección noreste, mientras que el espesor mínimo (13 cm) corresponde al punto MMA-34 ubicado a una distancia de 5.7 km al oeste del volcán (Figura 15b).

A su vez, los depósitos piroclásticos de caída del volcán Cerro del Agua presentan un aparente eje de dispersión principal con dirección noreste y fueron observados hasta una distancia de 7.3 km del volcán hacia la misma dirección, la cual corresponde a un depósito de 1.1 m de espesor. El espesor máximo corresponde al punto MMA-40 ubicado a una distancia de 6.2 km en dirección noreste, mientras que el mínimo (27 cm) se observó a una distancia de 6.9 km al noreste del volcán (MMA-22, Figura 15c).

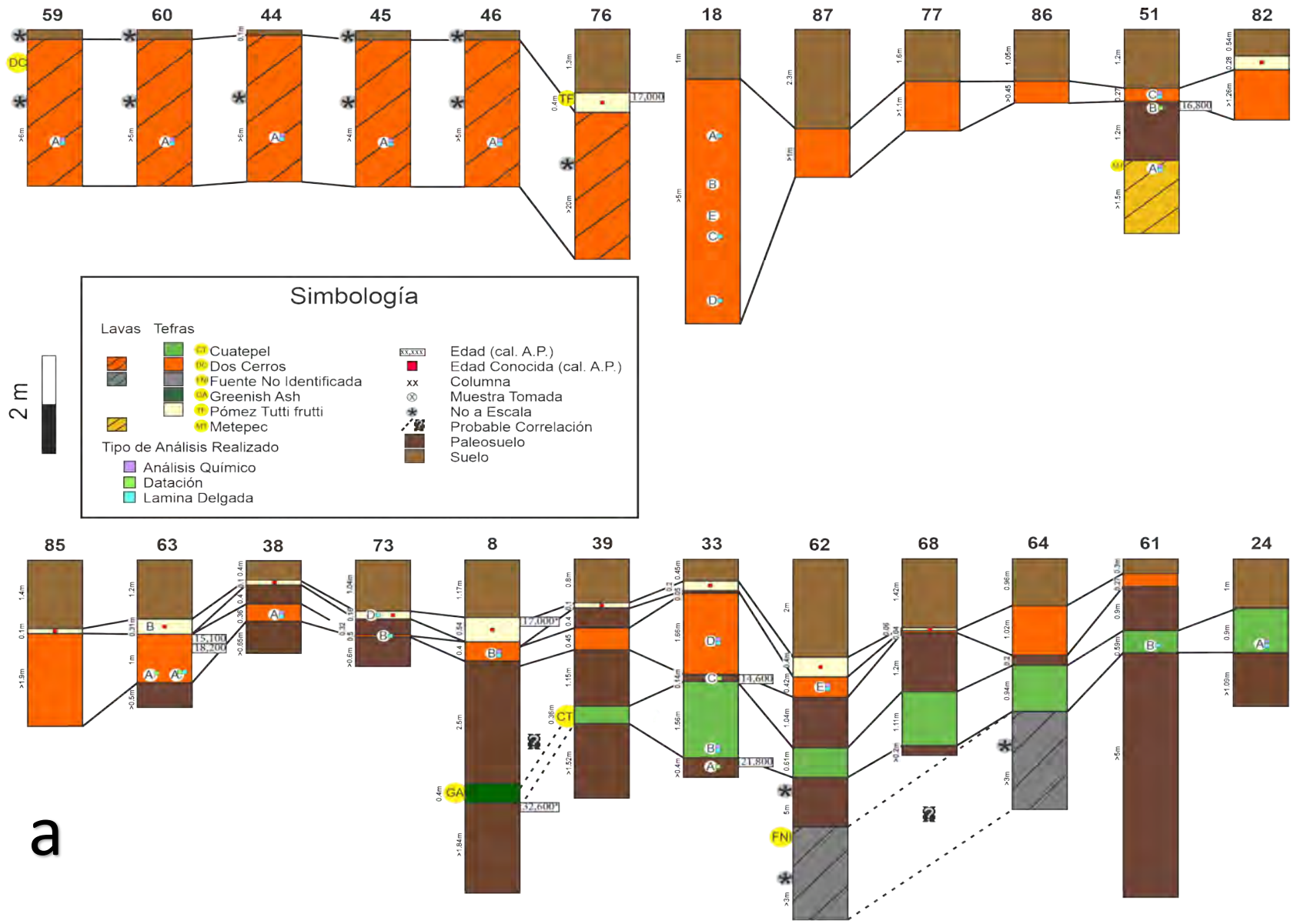


Figura 15a.- Se muestra la correlación de los productos de las diferentes erupciones estudiadas dentro del área. Además, se incluyen datos de los horizontes muestreados y se indica, el tipo de análisis realizado a dichas muestras (químico, lamina delgada, datación).

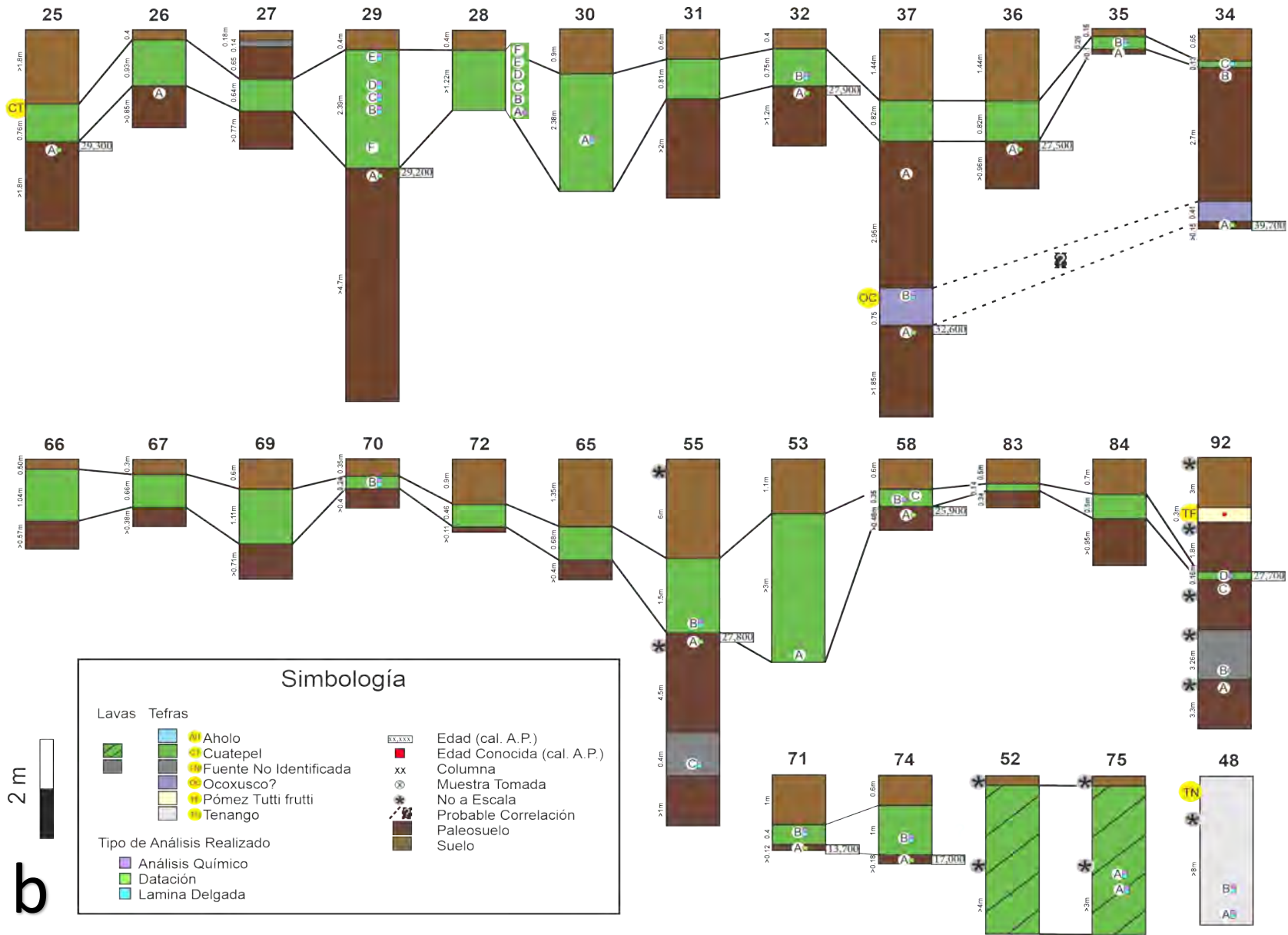


Figura 15b.- Se muestra la correlación de los productos de las diferentes erupciones estudiadas dentro del área. Además, se incluyen datos de los horizontes muestreados y se indica, el tipo de análisis realizado a dichas muestras (químico, lamina delgada, datación).

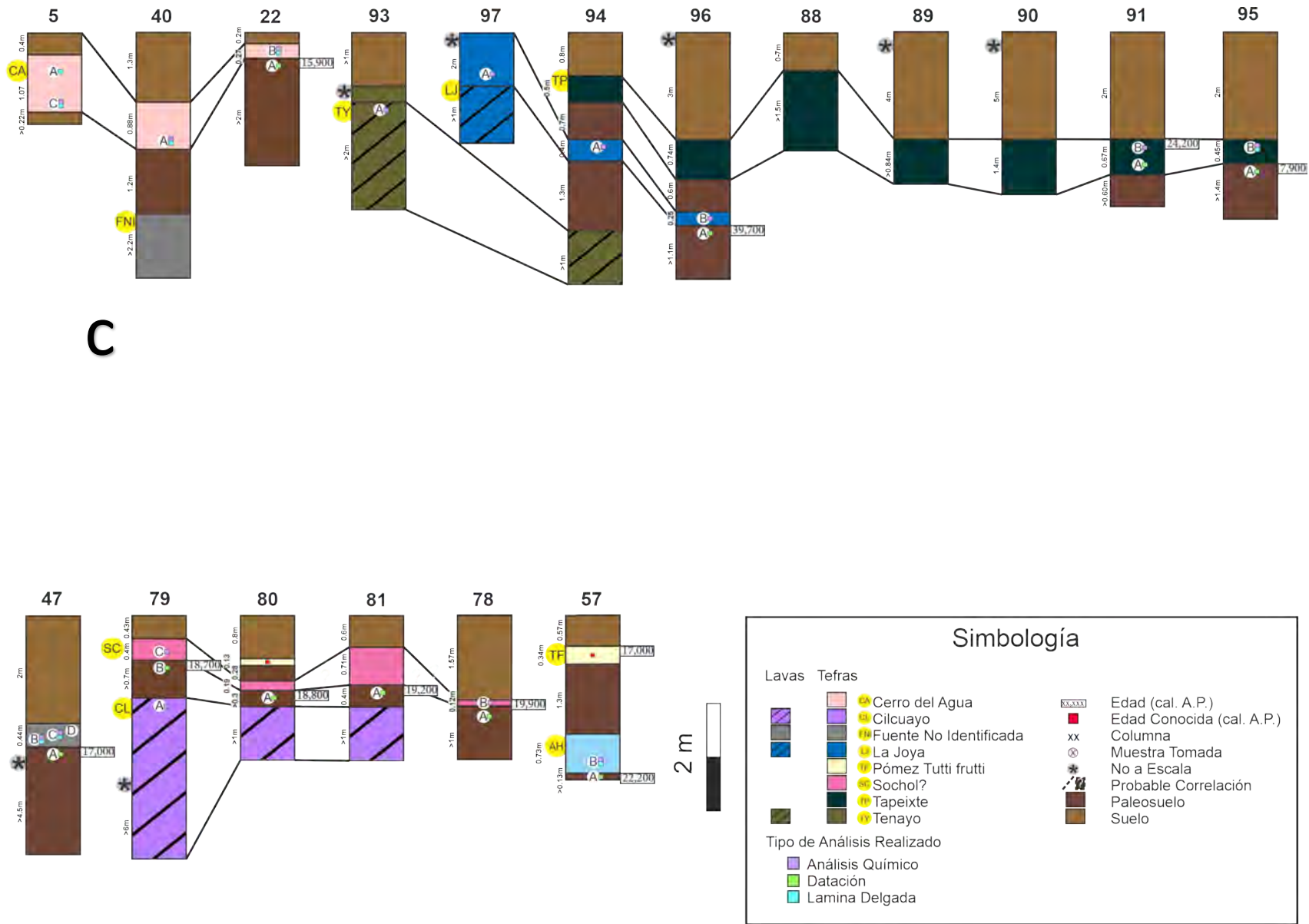


Figura 15c.- Se muestra la correlación de los productos de las diferentes erupciones estudiadas dentro del área. Además, se incluyen datos de los horizontes muestreados y se indica, el tipo de análisis realizado a dichas muestras (químico, lamina delgada, datación).

3.3 FECHAMIENTOS

Presentamos 28 nuevas dataciones en Tabla 3a, mientras compilamos dataciones publicadas en la Tabla 3b. Es necesario mencionar que las edades utilizadas en adelante para este trabajo son edades calibradas en años Antes del Presente (A.P.), que a su vez fueron redondeadas y promediadas.

En el caso del volcán Dos Cerros, se realizaron 5 fechamientos obteniendo un rango en su edad de 14,500 a 18,800 años A.P. Sin embargo, de estos 5 fechamientos, 3 de ellos reportan edades de 14,500, 15,100 y 16,800 años A.P., respectivamente, que son menores a la edad de la pómez Tutti Frutti, lo cual es incongruente con la estratigrafía (ver antes), motivo por el cual fueron descartadas. Los dos fechamientos restantes arrojan edades de 18,200 y 18,800 años A.P., los cuales fueron promediados y redondeados obteniendo el valor de 18,500 años A.P., para esta erupción. Sin embargo, la edad de 18,800 años A.P. se considera más cercana a la edad del depósito ya que se obtuvo en los primeros 5 cm del paleosuelo inmediato subyacente de una sección muy bien preservada.

Para el caso del volcán Cuatempel, se realizaron 10 fechamientos obteniendo un rango de 13,700 a 29,200 años A.P. De estos fechamientos dos fueron descartados ya que reportan edades de 13,700 y 17,000 años A.P., lo cual es incongruente con la posición estratigráfica de los depósitos abajo de la pómez TF. Otros dos fechamientos fueron descartados porque son significativamente más joven (21,900 A.P.) y más viejo (29,300 años A.P.), respectivamente de los demás fechamientos. Los 6 fechamientos restantes tienen edades cercanas de 25,900, 27,500, 27,700, 27,900, 27,800, y 29,200 años A.P. El promedio de estas edades dio un valor de 27,700 años A.P., el cual se considera como la edad más probable de la erupción.

Para el volcán Cerro del Agua, se realizó un solo fechamiento que dio una edad de 15,900 años A.P. Aunado a esto, existen 2 fechamientos más reportados en la literatura por Guilbaud y colaboradores (2015) con edades de 12,700 y 16,700 años A.P. De estos se descartó la edad de 12,700 años A.P., ya que los autores mencionan que el laboratorio reporto bajo contenido de materia orgánica en el análisis. El promedio de las dos fechas (15,900 años A.P y 16,700 años A.P) dio una edad aproximada de 16,300 años A.P.

Para el volcán Tapeixte se realizaron dos fechamientos obteniendo 7,900 y 24,200 años A.P. Sin embargo, la edad de 7,900 años A.P. es incongruente con la estratigrafía (ver en 3.2), motivo por el cual fue descartada. Este valor erróneo puede estar asociado a un factor de rejuvenecimiento, que puede explicarse a la penetración de raíces, percolación de ácidos orgánicos, así como al poco espesor de enterramiento que presenta el paleosuelo (Gould et al., 1979; Schneebeli, 1976). Cabe mencionar que la datación se realizó en ceniza que contenía fragmentos de carbón, por lo cual se tiene mayor certeza en la edad de esta erupción.

En el caso del volcán La Joya, se realizó un solo fechamiento, del cual se obtuvo una edad de 39,700 años A.P., que es consistente con su posición estratigráfica, ya que subyace a los depósitos del volcán Tapeixte (24,200 A.P.).

Otras edades se relacionan con depósitos cuyas fuentes no pudieron ser identificadas con certeza. Es necesario mencionar que las fuentes probables que se precisan a continuación se determinaron con respecto a la ubicación y el grosor de los depósitos. Además, para el volcán Aholo fue posible establecer que el depósito de tefra fechado tenía composición similar a una muestra del cono. El primer caso se relaciona con 4 fechamientos obteniendo edades de 18,700, 18,800, 19,200, 19,900 años A.P. los cuales fueron promediados y redondeados obteniendo el valor de 19,100 años A.P., siendo la fuente más probable el volcán Sochol. Seguidamente, se tiene un solo fechamiento con una edad de 22,200 años A.P. teniendo como fuente más probable al volcán Aholo. Por último, se tienen 2 fechamientos con edades de 32,600 y 39,700 en paleosuelos que están ubicados debajo depósitos con características similares. Del promedio y redondeo de estas, se obtiene el valor de 36,100 años A.P., que tiene como fuente más probable al volcán Ocoxusco. Finalmente, en solo dos casos, no se pudo averiguar el origen de los depósitos de ceniza asociados a los paleosuelos fechados (MMA-47A, MMA-92A), obteniendo edades aproximadas de 17,000 y 11,200 años A.P., sin embargo, la edad de 11,200 años A.P., se descarta por incongruencias estratigráficas al encontrarse subyaciendo los depósitos del volcán Cuatempel.

a	Volcán	Edad convencional (años AP)	Edad calibrada (años AP., 2 sigma)	Intersección de edad por radiocarbono y curva de calibración (años AP)	Edad calibrada promediada y redondeada (años AP)	δ 13C (‰)	Código de laboratorio	Código de muestra	Latitud N	Longitud O	Altitud msnm
	Cerro del Agua (CA)	13,200 +/- 40	15,980-15,750	15,855	15,900	-22.5	Beta - 413651	MMA-22-A	19°09'07.80"	98°59'03.60"	2,733
	Fuente No Identificada (FNI)	14,000 +/- 50	17,135-16,870	17,015	17,000	-25.1	Beta - 438563	MMA-47-A	19°09'57.17"	98°51'28.59"	2,435
	Dos Cerros (DC)	15,600 +/- 50	18,925-18,765	18,845	18,800	-24.6	Beta - 413652	MMA-23-A	19°06'58.50"	98°54'28.30"	2,676
	Dos Cerros (DC)	14,950 +/- 60	18,325-18,015	18,165	18,200	-21.3	Beta - 438569	MMA-63-A2	19°05'32.00"	98°53'48.50"	2,595
	Sochol? (SO)	15,390 +/- 50	18,755-18,575	18,670	18,700	-23.0	Beta - 457047	MMA-79-B	19°08'20.70"	98°58'14.10"	2,810
	Sochol? (SO)	15,600 +/- 50	18,963-18,730	16,930	18,800	-22.8	Beta - 468281	MMA-80 ^a	19°08'25.14"	98°58'14.64"	2,799
	Sochol? (SO)	15,950 +/- 50	19,452-19,040	17,340	19,200	-23.1	Beta - 468282	MMA-81 ^a	19°08'27.12"	98°58'15.78"	2,790
	Sochol? (SO)	16,500 +/- 50	20,096-19,688	18,070	19,900	-18.3	Beta - 468280	MMA-78 ^a	19°08'03.00"	98°57'59.88"	2,838
	Aholo? (AH)	18,370 +/- 70	22,405-22,085	22,300	22,200	-17.7	Beta - 438566	MMA-57-A	19°05'44.46"	98°49'18.66"	2,488
	Tapeixte (TP)	20,170 +/- 60	22,503-22,071	24,240	24,200	-19.5	Beta - 457048	MMA-91-A	19°08'53.77"	98°47'29.04"	2,466
	Cuatepel (CT)	21,590 +/- 100	26,005-25,730	25,875	25,900	-17.4	Beta - 438567	MMA-58-A	19°05'15.22"	98°50'08.50"	2,479
	Cuatepel (CT)	23,180 +/- 90	27,580-27,350	27,460	27,500	-18.9	Beta - 413659	MMA-36-A	19°05'37.20"	98°54'37.50"	2,735
	Cuatepel (CT)	23,500 +/- 80	27,820-27,485	25,780	27,700	-20.1	Beta - 468284	MMA-92C	19°07'34.08"	98°49'01.62"	2,456
	Cuatepel (CT)	23,720 +/- 90	27,895-27,690	27,785	27,800	-18.7	Beta - 438565	MMA-55-A	19°08'10.38"	98°50'21.06"	2,356
	Cuatepel (CT)	23,880 +/- 80	28,025-27,785	27,880	27,900	-24.0	Beta - 413655	MMA-32-A	19°06'07.90"	98°53'49.50"	2,623
	Cuatepel (CT)	25,160 +/- 100	29,440-28,955	29,215	29,200	-19.2	Beta - 413654	MMA-29-A	19°06'30.00"	98°52'17.40"	2,557
	Ocoxusco? (OC)	28,580 +/- 120	32,975-32,245	32,700	32,600	-23.8	Beta - 413660	MMA-37-A	19°05'33.50"	98°54'28.40"	2,702
	Ocoxusco? (OC)	35,130 +/- 210	40,145-39,175	39,705	39,700	-22.1	Beta - 413658	MMA-34-A	19°05'31.10"	98°54'52.20"	2,739
	La Joya (LJ)	35,190 +/- 270	38,477-37,102	39,765	39,700	-20.4	Beta - 457050	MMA-96-A	19°11'09.78"	98°47'47.88"	2,535
Dataciones incongruentes (ver texto)											
	Tapeixte (TP)	7,100 +/- 30	6,033- 5,905	7,940	7,900	-25.1	Beta - 457049	MMA-95-A	19°10'43.74"	98°47'25.20"	2,480
	Fuente No Identificada (FNI)	9,740 +/- 30	11,231-11,137	9,250	11,200	-23.6	Beta - 468283	MMA-92A	19°07'34.08"	98°49'01.62"	2,455
	Cuatepel (CT)	11,820 +/- 40	13,745-13,560	13,600	13,700	-20.9	Beta - 438570	MMA-71-A	19°03'55.90"	98°53'42.60"	2,655
	Dos Cerros (DC)	12,440 +/- 40	14,795-14,270	14,630	14,500	-18.7	Beta - 413657	MMA-33-C	19°06'08.20"	98°53'57.10"	2,642
	Dos Cerros (DC)	12,700 +/- 40	15,220-15,065	15,135	15,100	-24.5	Beta - 438568	MMA-63-A1	19°05'32.00"	98°53'48.50"	2,595
	Dos Cerros (DC)	13,870 +/- 50	16,975-16,625	16,815	16,800	-23.1	Beta - 438564	MMA-51-B	19°08'11.22"	98°50'43.38"	2,422
	Cuatepel (CT)	13,980 +/- 40	17,085-16,870	16,990	17,000	-21.0	Beta - 438571	MMA-74-A	19°03'28.20"	98°52'39.30"	2,531
	Cuatepel (CT)	18,040 +/- 60	21,960-21,745	21,855	21,900	-22.8	Beta - 413656	MMA-33-A	19°06'08.20"	98°53'57.10"	2,642
	Cuatepel (CT)	25,300 +/- 100	29,565-29,120	29,385	29,300	-17.8	Beta - 413653	MMA-25-A	19°06'31.90"	98°53'09.50"	2,544

Tabla 3.- Se muestran todas las dataciones utilizadas en este trabajo. La Tabla de datos 3a son propiamente los fechamientos realizados en este trabajo, por su parte la Tabla 3b corresponde a las dataciones reportadas en la literatura por diversos autores y recuperadas para este trabajo. Las dataciones que se presentan por separado corresponden a datos incongruentes con respecto a las relaciones estratigráficas.

b Volcán	Edad convencional (años AP)	Edad calibrada (años AP., 2 sigma)	Referencias	Edad calibrada promediada y redondeada (años AP)	δ 13C (‰)	Código de laboratorio	Código de muestra	Latitud N	Longitud O	Altitud msnm
Pelagatos	2,520+/-105	2,837-2,347	Guilbaud et al., 2009a	2,600			P60	-	-	-
Tlálloc	6,200+/-85	7,303-6,886	Siebe et al., 2005	7,100	-21.1	A-12937	TML-86	-	-	-
Cuahtzin	7,360 +/-120	8,388-7,969	Siebe et al., 2005	8,200	-25.3	A-12939	TML-72-B	-	-	-
Cuahtzin	8225+/-130	9,503-8,781	Siebe et al., 2005	9,100	-25.0	A-12938	TML-72-A	-	-	-
Cerro del Agua (CA)	13,760+201/-205	17,276-16,064	Guilbaud et al., 2015	16,700	-20.7	A-16331	MMA-5B	19° 07' 58.80"	98° 56' 06.30"	2,901
Popocatepetl Pómez Tutti Frutti (TF)	14,065+500/-470	18,378-15,761	Sosa-Ceballos et al., 2012	17,100	-25.3	A-8690	95327-A	-	-	-
Xistune? (XI)	16,850±60	18,574–18,156	Guilbaud et al., 2015	18,400	-22.5	B-378072	MMA-22C	19° 09' 41.50"	99° 00' 41.50"	2,871
San Miguel (SM)	16,475+235/-230	20,487-19,311	Guilbaud et al., 2015	19,900	-20.2	A-16340	MMA-0D	19° 10' 10.50"	99° 00' 27.20"	2,780
San Miguel (SM)	16,670+/-150	20,509-19,714	Guilbaud et al., 2015	20,100	-21.7	A-16337	MMA-13B	19° 10' 30.00"	99° 00' 36.00"	2,676
Hijo del Cuahtzin	20,895+/-235	25,711-24,521	Siebe et al., 2005	25,100	-23.9	A-12936	TML-07	-	-	-
Ocusucayo	21,675+220/-215	26,422-25,551	Siebe et al., 2005	26,000	-22.4	A-13413	TML-87	-	-	-
Greenish Ash (GA)	26,065+420/-400	31,025-29,380	Guilbaud et al., 2015	29,400	-21.3	A-16333	MMA-7A	19° 10' 18.00"	99° 00' 00.50"	2,697
Greenish Ash (GA)	28,590+410/-390	31,625–29,586	Guilbaud et al., 2015	30,600	-21.7	A-16334	MMA-8A	19° 10' 18.00"	99° 00' 00.50"	2,697
Teuhtli (TE)	31,790+755/-690	37,986-34,381	Guilbaud et al., 2009a	36,200	-20.7	A-16338	MMA-14A	19° 10' 40.80"	99° 01' 10.90"	2,642
Dataciones incongruentes (ver texto)										
Cuahtzin	2,800+/-50	3,037-2,782	Siebe et al., 2005	2,900	-26.5	A-12940	TML-72-C	-	-	-
Cerro del Agua (CA)	10,845+290/-280	13,348-11,985	Guilbaud et al., 2015	12,700	-23.7	A-16339	MMA-19B	19° 08' 56.70"	98° 58' 40.90"	2,742
Ocusucayo	13,585+/-75	16,658-16,129	Siebe et al., 2005	16,400	-24.0	AA-50119	TML-14	-	-	-
Greenish Ash (GA)	18,530+175/-170	20,845–19,983	Guilbaud et al., 2015	20,400	-21.6	A-16332	MMA-6A	19° 09' 46.70"	98° 59' 30.10"	2,733

Tabla 3.- Se muestran todas las dataciones utilizadas en este trabajo. La Tabla de datos 3a son propiamente los fechamientos realizados en este trabajo, por su parte la Tabla 3b corresponde a las dataciones reportadas en la literatura por diversos autores y recuperadas para este trabajo. Las dataciones que se presentan por separado corresponden a datos incongruentes con respecto a las relaciones estratigráficas.

Se determinaron edades relativas para los productos que se encuentran dentro del área de estudio, utilizando como referencia a las relaciones estratigráficas (Figura 15a,b,c) existentes respecto a las edades obtenidas para este estudio, así como las reportadas en la literatura (Siebe et al., 2005; Sosa-Ceballos et al., 2012; Guilbaud et al., 2015; Tabla 4).

Tabla 4.- Edades relativas de las erupciones del área de estudio obtenidas a través de relaciones estratigráficas. Pre=más antiguo, Post=más reciente.

Nombre del Volcán	Edad relativa (cal ap)	Clasificación	Nombre del Volcán	Edad relativa	Clasificación
Ocotecatí	>7,100	pre-Tláloc	Metepec	>18,500	pre-Dos Cerros
Pajonal	>7,100	pre-Tláloc	Amoloc	>27,700	pre-Cuatepel
Pelagatos	<17,000->2,600	post-Tutti Frutti	Atlalcorra	>27,700	pre-Cuatepel
Tlacotenco	<7,100	post-Tutti Frutti	Huipilo	>27,700	pre-Cuatepel
Cilcuayo	>17,000	pre-Tutti Frutti	Joyacan	>27,700	pre-Cuatepel
Huehuel	>17,000	pre-Tutti Frutti	Tepenagasco	>27,700	pre-Cuatepel
Cohuazalo	>17,000	pre-Tutti Frutti	Zoyazal	>27,700	Pre-Cuatepel
Ayaqueme	>18,500	pre-Dos Cerros	Ahuazatepel	>36,200	pre-Cuatepel
Cuajomac	>18,500	pre-Dos Cerros	Tlapexcua	>36,200	pre-Cuatepel
Mesa Santa Rosa	>18,500	pre-Dos Cerros	Tenayo	>39,700	pre-Cuatepel

3.4 MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA

Se estudio con detalle la mineralogía y petrografía de los productos piroclásticos (tefra) de los volcanes Cerro del Agua, Cuatepel y Dos Cerros, los cuales clasifican principalmente en el campo de las andesitas basálticas y las andesitas (Le Bas et al., 1986; Figura 28a,b, ver en el apartado 3.5). En este estudio, se distinguió entre fenocristales (cristales >300 μm), microfenocristales (entre 30 y 300 μm), y microlitos (<30 μm). Las tefras de los volcanes arriba citados presentan fenocristales de olivino (Ol), clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx) y plagioclasa (Pg). Además, se observan microfenocristales de Pg principalmente, pero también de Ol, Cpx, y Opx. Los fenocristales de Ol, Cpx y Opx presentan en todas las muestras un alto contenido de inclusiones de óxidos, de formas poligonales euhedrales, que varían de opacas a ligeramente transparentes, con un color

marrón-rojizo (posiblemente cromitas). Inclusiones de apatito son observables en todos los productos de Dos Cerros y solamente en los productos más diferenciados de Cuatempel y Cerro del Agua. La matriz se encuentra conformada principalmente por vidrio y microlitos de Pg. Los fenocristales de Ol y Cpx presentan inclusiones de óxidos, las cuales son muy abundantes en el Ol, menos comunes en el Cpx y muy escasas en el Opx. Cabe mencionar que se observa comúnmente la presencia alrededor de Cpx de bordes con índices menores de birrefringencia, lo cual podría estar relacionado con bordes de reacción de Opx. La Pg se presenta principalmente como microfenocristal y microlito. Los opacos están compuestos fundamentalmente por óxidos, de formas poligonales euedrales, probablemente magnetitas e ilmenitas.

Los productos de cada uno de estos tres volcanes están descritos con detalle a continuación.

3.4.1 DOS CERROS

El volcán Dos Cerros presenta una composición modal en la que los fenocristales van de 0.3 a 3.4% en volumen (vol.%), mientras que los microfenocristales varían entre 4.9 y 31 vol.%, y la matriz (vidrio+microlitos+opacos) presenta valores de 65.2 a 87.8 vol.% (Tabla 5). Dicho lo anterior, se observa que los microfenocristales son los tipos de cristales más abundantes. Para el caso de las vesículas, se observan valores de 1.0 a 8.7 vol.%. Los fenocristales más abundantes son el Ol y el Cpx, mientras que el principal microfenocristal es la Pg. El vidrio presenta valores de 55.8 a 71.6 vol.%.

Los fenocristales (0.3 a 1.2 vol.%) y microfenocristales (0.3 a 2.1 vol.%) de Ol que se encuentran predominantemente fracturados y presentan abundantes inclusiones de óxidos, (Figura 16). Algunos cristales presentan bordes de reacción de Cpx. La forma de los cristales es subhedral predominantemente, mientras algunos son euedrales.

El Cpx es abundante como fenocristal (0 a 1.2 vol.%) y microfenocristal (0.4 a 1.2 vol%), también presenta inclusiones de cromitas (Figura 17), aunque en menor cantidad con respecto a las observadas en el Ol. La forma que los cristales presentan es subhedral predominantemente, así como euedrales.

Los fenocristales (0 a 0.5 vol.%) de Opx son escasos y presentan menos inclusiones de óxidos que los cristales Ol y Cpx, cómo y microfenocristales incrementa ligeramente su abundancia (0 a 1.1 vol.%; Figura 18). Presentan formas subhedrales y euedrales. De manera general se observa creciendo sobre cristales de Cpx.

La plagioclasa se encuentra predominantemente como microfenocristal (3.5 a 28.5 vol.%) y microlitos (2.4 a 25.5 vol.%) mientras, los fenocristales son muy escasos (0 a 0.9 vol.%). Los cristales varían de euedrales a subhedrales en forma, incluyen inclusiones de apatito y se encuentran principalmente formando aglomerados embebidos en matriz vítrea (Figura 19). Suelen presentar maclados lamelares, carlsbald y polisintético.

Tabla 5.- Análisis modal de los productos piroclásticos del volcán Dos Cerros. Los valores están en % del volumen total sin contar las vesículas. El conteo fue de 1000 puntos para cada lámina delgada. Feno=fenocristal, Micro=microfenocristal.

Muestra	MMA-23-B		MMA-23-C		MMA-23-D		MMA-23-E		
Lamina	MMA-23-B1	MMA-23-B2	MMA-23-C1	MMA-23-C2	MMA-23-D1	MMA-23-D2	MMA-23-E1	MMA-23-E2	
Feno	Olivino	0.8%	0.2%	1.2%	0.6%	0.5%	0.3%	0.6%	1.2%
	Plagioclasa	0.5%	0.0%	0.5%	0.9%	0.3%	0.7%	0.0%	0.7%
	Clinopiroxeno	0.3%	0.2%	1.2%	0.4%	0.8%	0.9%	0.3%	0.0%
	Ortopiroxeno	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.5%	0.3%	0.0%	0.1%
Micro	Olivino	1.1%	1.7%	2.1%	1.6%	1.3%	0.3%	0.8%	0.4%
	Plagioclasa	25.2%	28.5%	27.2%	23.2%	19.1%	21.9%	3.5%	7.1%
	Clinopiroxeno	0.6%	0.7%	1.2%	1.0%	1.0%	1.1%	0.5%	0.4%
	Ortopiroxeno	0.0%	0.2%	1.1%	0.4%	0.2%	1.0%	0.2%	0.1%
Matriz	Olivino	10.3%	0.0%	0.5%	0.2%	0.2%	0.3%	2.1%	1.0%
	Plagioclasa	4.7%	8.6%	3.2%	2.4%	2.9%	3.2%	25.5%	19.1%
	Piroxeno	0.2%	0.2%	0.5%	0.0%	1.0%	0.3%	0.6%	0.1%
	Opacos	0.5%	0.3%	0.5%	0.2%	0.8%	0.3%	0.3%	0.1%
	Vidrio	55.8%	59.6%	60.4%	68.7%	71.6%	69.4%	57.7%	67.4%
Total	Matriz	71.4%	68.7%	65.2%	71.6%	76.4%	73.5%	86.3%	87.8%
	Feno	1.6%	0.3%	3.4%	2.2%	2.1%	2.2%	1.0%	2.0%
	Micro	27.0%	31.0%	31.7%	26.2%	21.5%	24.3%	4.9%	8.1%
	Vesículas	8.7%	3.7%	6.7%	1.0%	5.9%	1.4%	6.3%	2.3%

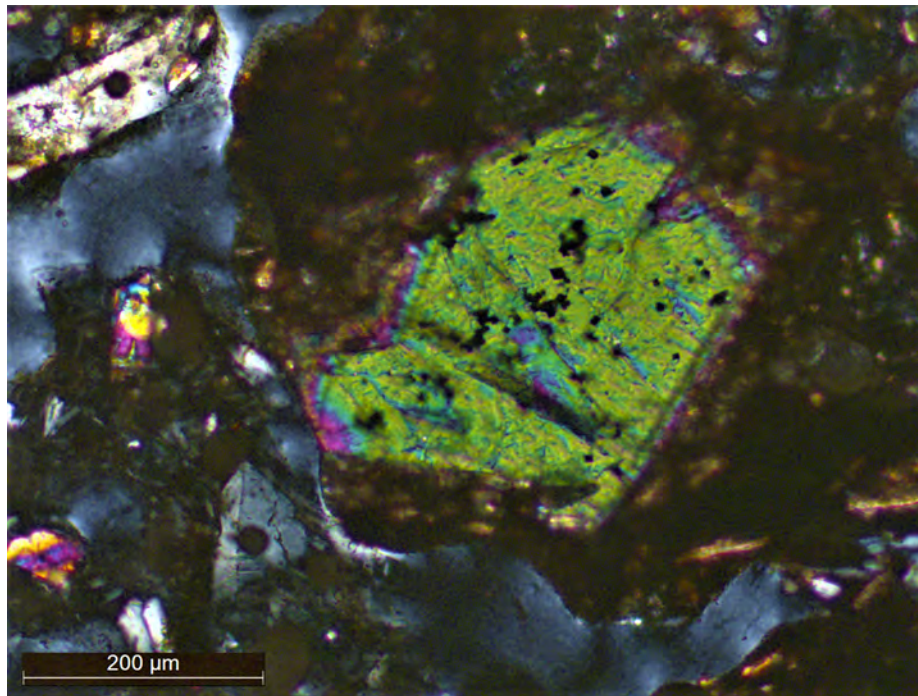


Figura 16.- Fenocristal de Ol con inclusiones de óxidos, embebido en matriz oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-23-C1.

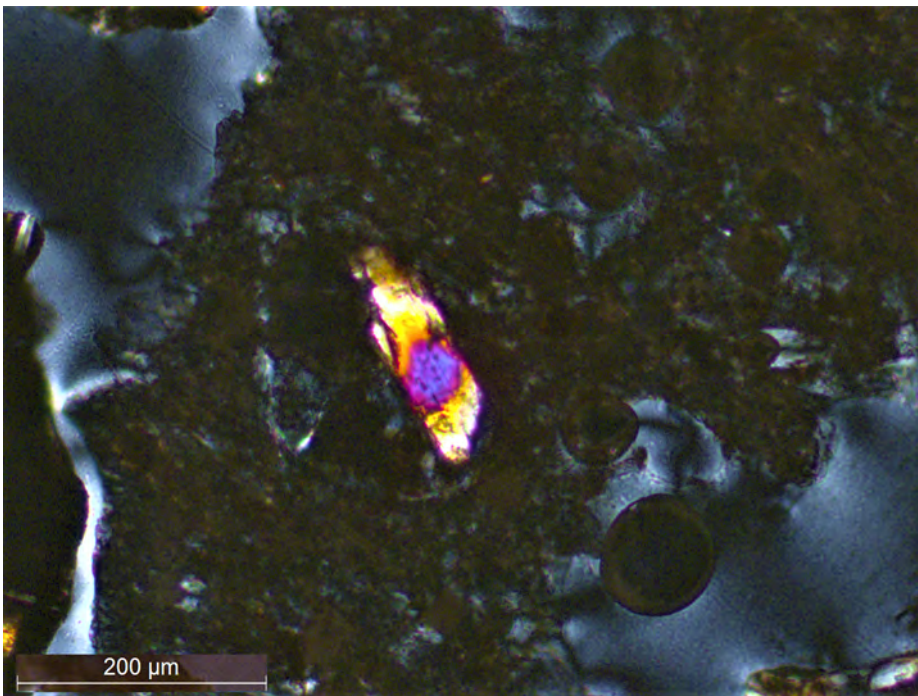


Figura 17.- Microfenocristal de Cpx con bordes de Opx, embebidos en matriz vítrea clara (sideromelano). Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-23-C1.

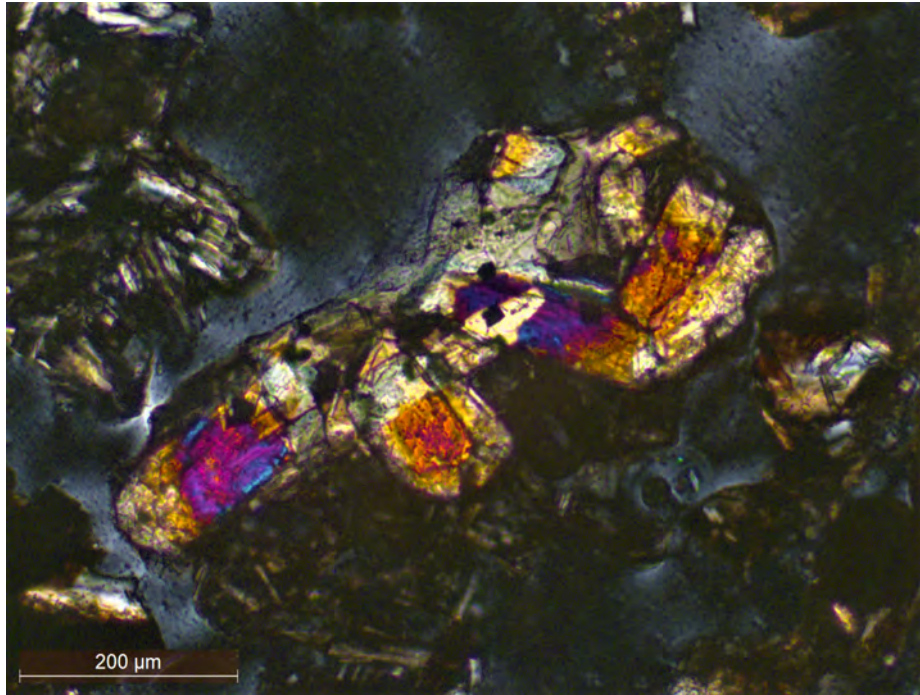


Figura 18.- Microfenocristal de Cpx como núcleo con inclusiones de óxidos al centro de la microfotografía, siendo reemplazado por Opx. También se pueden observar (arriba a la izquierda) los aglomerados que forman los microfenocristales y microlitos de Pg. Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-23-D2.

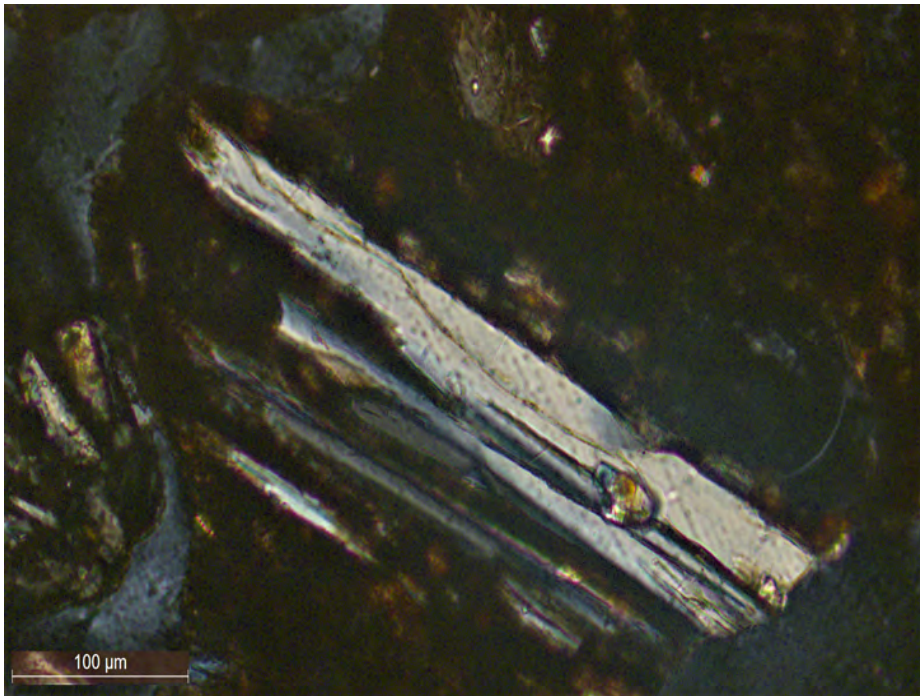


Figura 19.- Microfenocristal de Pg embebidos en matriz vítrea oscura (taquilitia). Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-23-B2.

3.4.2 CUATEPEL

El volcán Cuatapel presenta una composición modal (Tabla 6) en la que los fenocristales van de 0.3 a 6.4 vol.% mientras que, los microfenocristales se encuentran en un rango de 23.6 a 32.1 vol.% y la matriz (vidrio+microlitos+opacos) presenta valores de 67.2 a 71.7 vol.%. Para el caso de las vesículas, se observan valores de 3.1 a 7.7 vol.%. Sus principales fenocristales son el Ol y Cpx, mientras que, el principal microfenocristal es la Pg. A su vez, el vidrio presenta valores de 56.7 a 62 vol.%.

El Ol es uno de los principales fenocristales (0.2 a 3.0 vol.%) y se encuentra predominantemente fracturado (Figura 20), aunque es posible observar escasos cristales con poco fracturamiento, ambas poblaciones pueden presentar abundantes inclusiones de óxidos y grandes inclusiones de vidrio. La forma de los cristales es subhedral predominantemente, aunque hay algunos euedrales.

El Cpx es abundante como fenocristal (0 a 2.8 vol.%) y también presenta inclusiones de óxidos (Figura 21), aunque en menor cantidad con respecto a las observadas en el Ol. La forma que los cristales presentan es subhedral predominantemente, aunque hay euedrales.

El Opx (Figura 22) es escaso como fenocristal (0 a 0.4 vol.%), preferentemente se encuentra como microfenocristal (0 a 0.4 vol.%), presenta inclusiones de óxidos, aunque muy reducidas en abundancia con respecto a las observadas en Ol y Cpx. Se presenta con formas subhedrales y euedrales. Es necesario precisar que de manera general se forma sobre núcleos de Cpx.

La Pg se encuentra predominantemente como microfenocristal (21.2 a 27.3 vol.%) y microlito (6.7 a 11.3 vol.%), los fenocristales son muy escasos (0 a 0.6 vol.%) y presentan zonamiento (Figura 23). Los cristales son euedrales y subhedrales, tienen inclusiones de apatito y se encuentran principalmente formando aglomerados embebidos en matriz vítrea. Suelen presentar maclados lamelares, carlsbald y polisintético.

Tabla 6.- Análisis modal de los productos piroclásticos del volcán Cuatempel. Los valores están en % del volumen total sin contar las vesículas. El conteo fue de 1000 puntos para cada lámina delgada. Feno=fenocristal, Micro=microfenocristal.

Muestra	MMA-29-F		MMA-29-B		MMA-29-C		MMA-29-D0		MMA-29-D			
Lamina	MMA-29-F0	MMA-29-F1	MMA-29-B0	MMA-29-B1	MMA-29-B2	MMA-29-C	MMA-29-D0	MMA-29-D1	MMA-29-E0	MMA-23-E1	MMA-23-E2	
Feno	Olivino	3.0%	1.4%	2.0%	0.7%	0.2%	0.8%	2.3%	0.7%	1.6%	0.5%	0.2%
	Plagioclasa	0.6%	0.2%	0.4%	0.0%	0.0%	0.3%	0.5%	0.2%	0.4%	0.0%	0.0%
	Clinopiroxeno	2.5%	1.0%	2.5%	0.0%	0.0%	1.2%	2.8%	1.0%	2.5%	0.6%	0.2%
	Ortopiroxeno	0.4%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.0%	0.3%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%
Micro	Olivino	1.0%	2.4%	0.7%	1.5%	1.6%	1.4%	0.9%	1.5%	0.9%	1.1%	0.5%
	Plagioclasa	23.1%	23.8%	24.3%	26.2%	27.3%	26.6%	21.2%	23.5%	24.3%	25.1%	27.3%
	Clinopiroxeno	1.3%	2.0%	1.1%	1.0%	2.9%	1.9%	1.2%	1.2%	1.1%	2.1%	1.4%
	Ortopiroxeno	0.4%	0.3%	0.4%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.0%
Matriz	Olivino	2.3%	0.8%	2.0%	0.7%	0.0%	0.5%	0.5%	0.7%	0.4%	0.8%	0.3%
	Plagioclasa	7.2%	8.7%	8.6%	10.1%	8.2%	7.8%	6.7%	8.5%	10.6%	11.3%	8.2%
	Piroxeno	1.1%	1.0%	0.2%	0.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.5%	0.5%	0.5%	0.6%
	Opacos	0.6%	0.3%	0.5%	0.3%	0.2%	0.5%	0.5%	0.0%	0.3%	0.2%	0.0%
	Vidrio	56.7%	57.9%	55.9%	58.9%	59.0%	57.9%	61.7%	62.0%	57.7%	57.4%	61.3%
Matriz	67.7%	68.8%	67.2%	70.0%	68.3%	67.6%	70.3%	71.7%	69.6%	70.2%	70.5%	
Total	Feno	6.4%	2.7%	5.0%	0.8%	0.3%	2.3%	6.0%	1.8%	4.7%	1.1%	0.3%
	Micro	25.7%	28.5%	26.5%	28.9%	32.1%	30.0%	23.6%	26.5%	26.5%	28.5%	29.2%
	Vesículas	7.7%	4.8%	6.7%	3.7%	3.3%	5.2%	7.2%	4.8%	6.3%	3.6%	3.1%

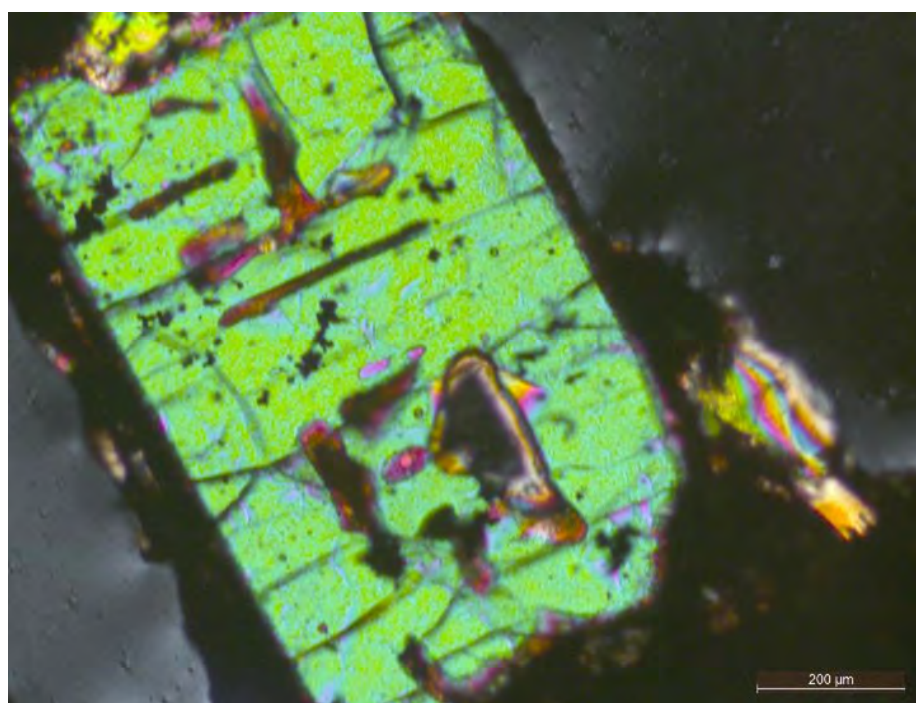


Figura 20.- Fenocristal de Ol con inclusiones de óxidos. Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-29-B0.

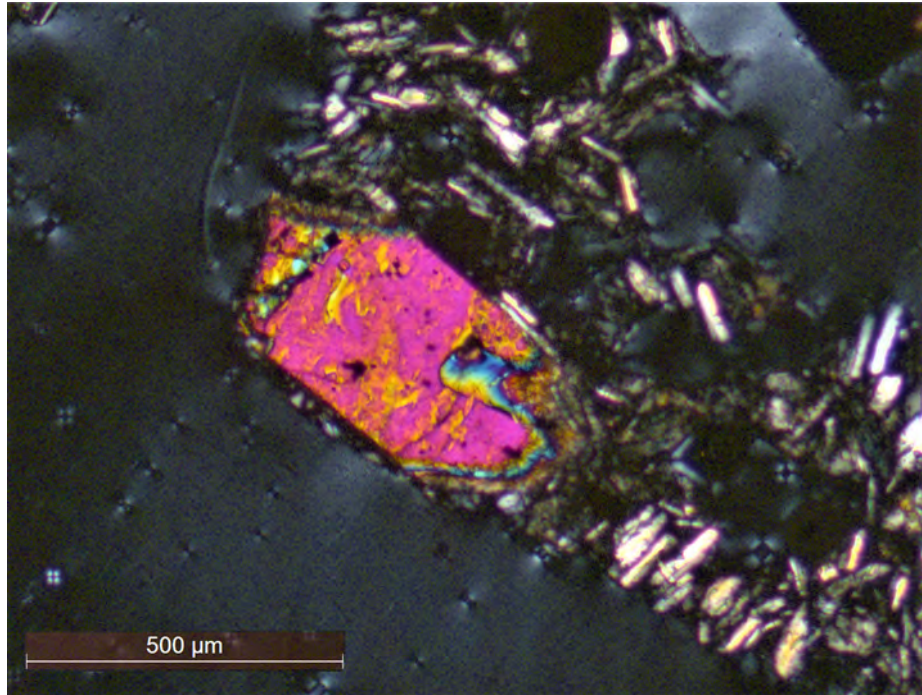


Figura 21.- Fenocrystal de Cpx con inclusiones de óxidos, embebido en matriz vítrea clara (sideromelano). Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-29-E0.

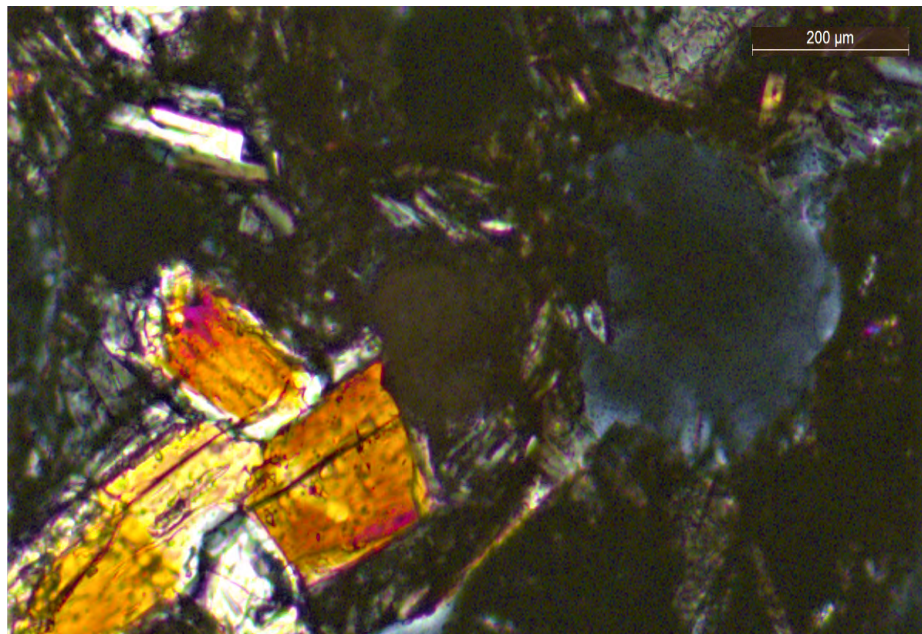


Figura 22.- Microfenocrystal de Opx con inclusiones de óxidos, embebidos en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-29-B0.

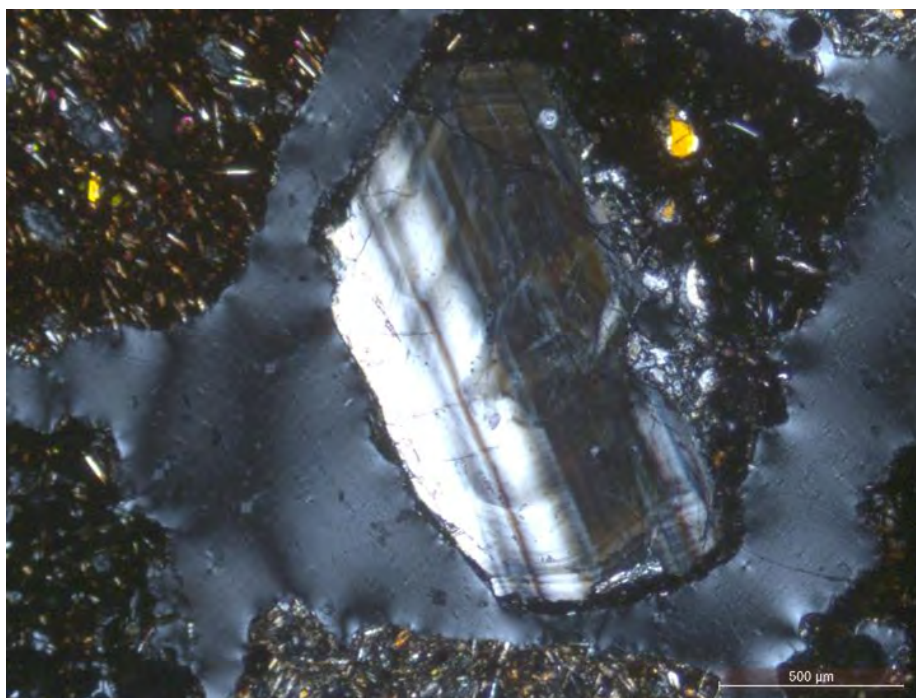


Figura 23.- Fenocristal de Pg que presenta zonamiento y maclado polisintético, además de encontrarse embebido en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-29-F0

3.4.3 CERRO DEL AGUA

El volcán Cerro del Agua presenta una composición modal en la que los fenocristales van de 2.3 a 5.3 vol.% (Tabla 7). Los microfenocristales se encuentran en un rango de 22.4 a 31 vol.%, y la matriz (vidrio+microlitos+opacos) presenta valores de 66.3 a 76.5 vol.%. Para el caso de las vesículas, se observan valores de 6.7 a 9.9 vol.%. Sus principales fenocristales son el Ol y Cpx, mientras que, el principal microfenocristal es la Pg. A su vez, el vidrio presenta valores de 53.7 a 57.7 vol.%.

El olivino es uno de los principales fenocristales (1.1 a 2.1 vol.%). Presentan abundantes inclusiones de óxidos y se encuentra predominantemente fracturados (Figura 24). La forma de los cristales es subhedral predominantemente, así como algunos euedrales.

El Cpx como fenocristal (0.8 a 3.1 vol.%) también es abundante y presenta inclusiones de óxidos (Figura 25), pero en menor proporción que las observadas en Ol. La forma que los cristales presentan es subhedral predominantemente, aunque hay algunos euedral.

El Opx (Figura 26) como fenocristal se encuentra prácticamente ausente, mientras que es poco abundante como microfenocristal (0.3 a 0.6 vol%). Los microfenocristales tienen formas subhedrales y euedrales. Cabe mencionar que principalmente se encuentra creciendo sobre Cpx.

La Pg (Figura 27) como fenocristal (0.2 a 0.3 vol.%) es escasa y tienen zoneamiento, se encuentra predominantemente como microfenocristal (19.7 a 27.5 vol.%) y microlito (11.3 a 14.0 vol.%). Los cristales son euedrales y subhedrales, los cuales tienen inclusiones de apatito y se encuentran principalmente formando aglomerados embebidos en matriz vítrea. Suelen presentar maclados lamelares, carlsbald y polisintético.

Tabla 7.- Análisis modal de los productos piroclásticos del volcán Cerro del Agua. Los valores están en % del volumen total sin contar las vesículas. El conteo fue de 1000 puntos para cada lámina delgada. Feno=fenocristal, Micro=microfenocristal

	Muestra	MMA-22-B	MMA-40-A
	Lamina	MMA-22-B	MMA-40-A
Feno	Olivino	2.1%	1.1%
	Plagioclasa	0.2%	0.3%
	Clinopiroxeno	3.1%	0.8%
	Ortopiroxeno	0.0%	0.0%
Micro	Olivino	1.0%	1.4%
	Plagioclasa	27.5%	19.7%
	Clinopiroxeno	2.1%	0.6%
	Ortopiroxeno	0.3%	0.6%
Matriz	Olivino	0.8%	1.8%
	Plagioclasa	11.3%	14.0%
	Piroxeno	0.5%	2.9%
	Opacos	0.0%	0.2%
	Vidrio	53.7%	57.7%
Total	Matriz	66.3%	76.5%
	Feno	5.3%	2.3%
	Micro	31.0%	22.4%
	Vesículas	6.7%	9.9%

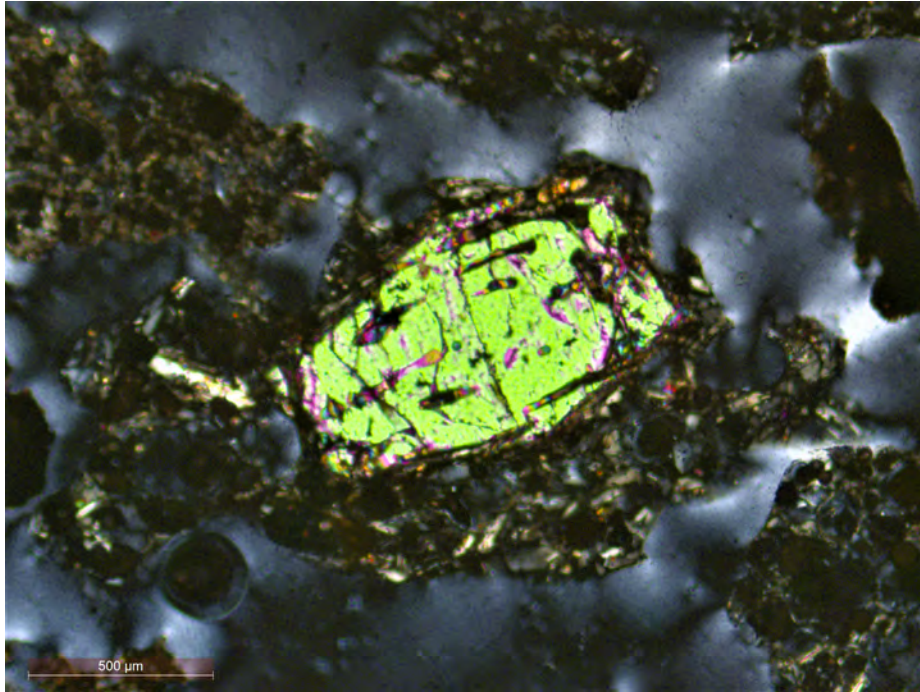


Figura 24.- Fenocristal de Ol con inclusiones de óxidos y vidrio, embebido en matriz vítrea clara (sideromelano). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-40A.

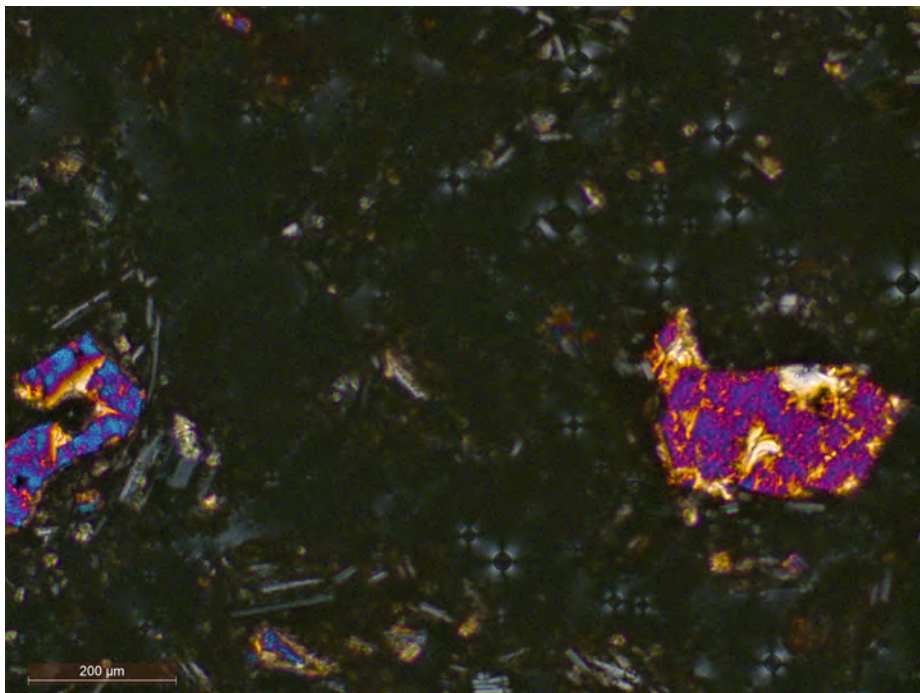


Figura 25.- Microfenocristal de Cpx con bordes de Opx. embebidos en matriz vítrea oscura (taquillita). Microfotografía tomada con nícoles cruzados, MMA-40A.

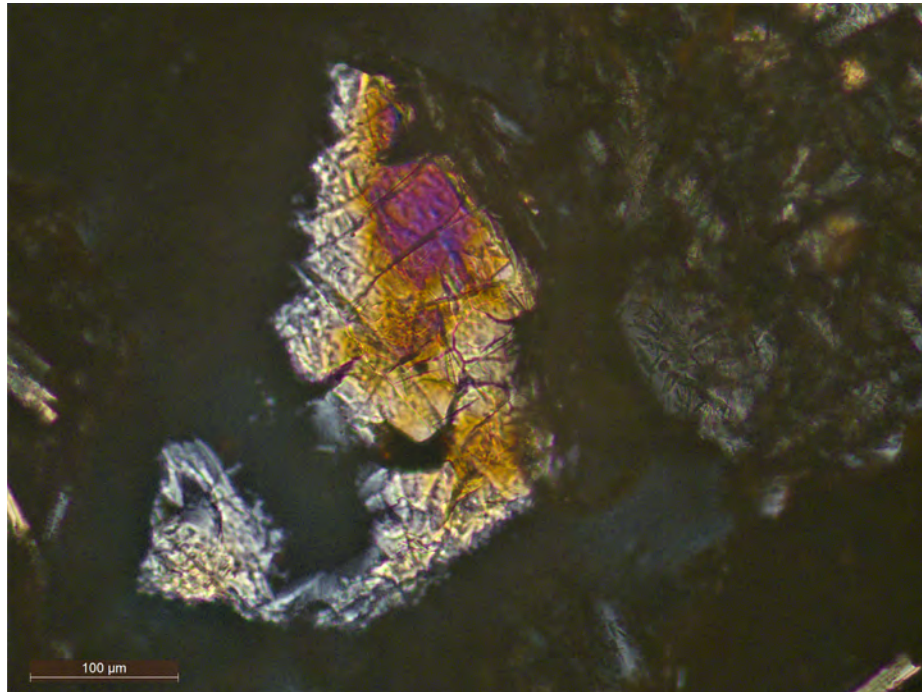


Figura 26.- Microfenocristal de Cpx como núcleo con inclusiones de óxido..Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-22B.

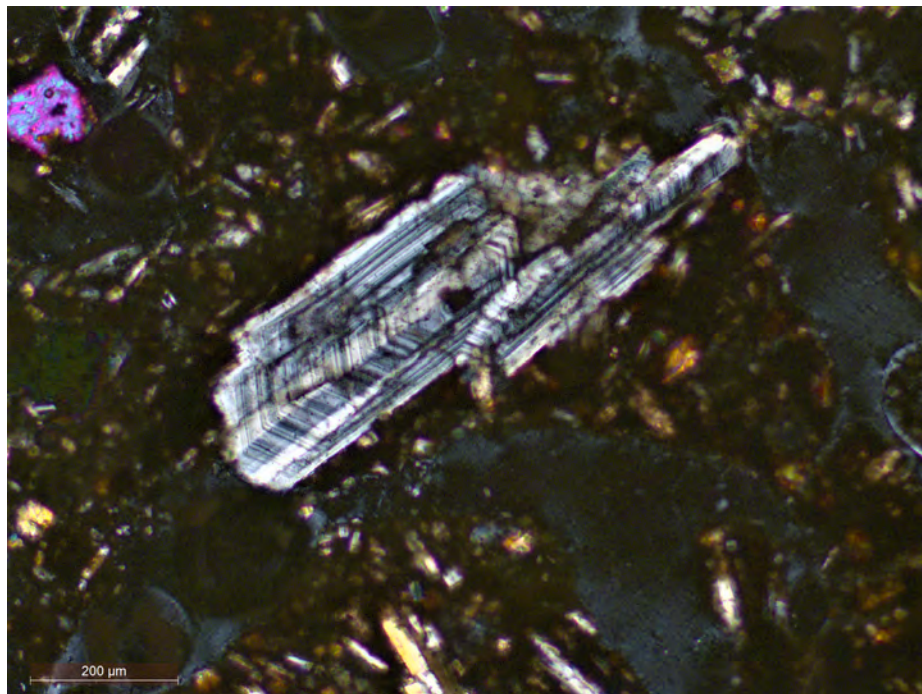


Figura 27.- Fenocristal de Pg que presenta zoneamiento, además de encontrarse embebido en matriz vítrea oscura (taquilita). Microfotografía tomada con nicoles cruzados, MMA-22B.

En resumen, se pueden observar claras diferencias entre los productos de las erupciones de Dos Cerros Cuatapel y Cerro del Agua.

Dos Cerros presenta menor contenido de fenocristales de Ol (0.2 a 1.2 vol.%) con respecto a Cuatapel (0.2 a 3.0 vol.%) y Cerro del Agua (1.1 a 2.1 vol.%). Para el caso de fenocristales de Cpx, el volcán que presenta el mayor contenido es Cerro del Agua (0.8 a 3.1 vol.%), mientras que Dos Cerros el menor (0.0 a 1.2 vol.%), y Cuatapel un valor intermedio (0.2 a 2.8 vol.%). Para los microfenocristales de Pg. Dos Cerros es el volcán que presenta el mayor contenido (3.5 a 28.5 vol.%), seguido por Cuatapel (21.2 a 27.3 vol.%) y Cerro del Agua (19.7 a 27.5 vol.%). Por último, en el contenido de vesículas, se muestra que el volcán Cerro del Agua presenta el mayor contenido (6.7 a 9.9 vol.%) mientras que el menor corresponde a Dos Cerros (1.0 a 8.7 vol.%) y Cuatapel un valor intermedio (3.1 a 7.7 vol.%).

3.5 GEOQUÍMICA

Se analizó la composición química de los productos de los volcanes dentro del área de estudio, así como las variaciones que presentan con el fin de distinguir características genéticas y afinidad tectónica. Es necesario mencionar que el mayor número de datos obtenidos corresponden a los volcanes Cerro del Agua, Dos Cerros y Cuatempel, de tal forma que, se realiza una comparación entre los productos de dichas fuentes, con el fin de establecer campos composicionales característicos para estas tres grandes erupciones. Los datos que aquí se presentan, son resultados de análisis de roca total de tefras y lavas, propios de este estudio, además de los datos recopilados de la literatura (todos los resultados químicos se presentan en tablas de datos en el anexo I). El número total de datos analizados corresponde a 87 muestras, distribuidas de la siguiente manera: 55 propios de este estudio y 32 recopilados de la literatura (20 de Agustín-Flores et al., 2011; 5 de Guilbaud et al., 2015; 5 de Schaaf et al., 2005; 2 de Straub et al., 2008). Para la clasificación química de los diversos productos dentro del área de estudio, se utilizó el diagrama “Total Alkali vs Silica” (TAS, Le Bas et al., 1986; Figura 28a), además de incluir la línea de McDonald y Katsura (1964) que distingue los campos alcalino y subalcalino., A su vez, el campo subalcalino se subdivide según la afinidad que presentan los productos en dos series magmáticas: calcoalcalina y toleítica. Esta división se realiza con base en el grado de enriquecimiento en FeO durante la evolución magmática (diagrama AFM de Irvine y Baragar, 1971; Figura 28b).

El diagrama TAS (Figura 28a) permite apreciar que todos los productos caen en los campos de la andesita basáltica y la andesita, sin embargo, es necesario mencionar que los datos mostrados en el diagrama TAS, no incluyen los reportados por Siebe y colaboradores (2005), quienes presentan cuatro erupciones correspondientes a los volcanes Tláloc ($\text{SiO}_2=58.7-63.7$ % en peso), Ocusacayo ($\text{SiO}_2=55.6-65.1$ % en peso), Cuauhtzin ($\text{SiO}_2=62.7-63.9$ % en peso), e Hijo del Cuauhtzin ($\text{SiO}_2=62.8-64.9$ % en peso), de los cuales solo los dos primeros se encuentran dentro del área de estudio, pero se localizan en la porción límite occidental de nuestro polígono, en el caso de los dos últimos, no se encuentran dentro del área, pero se ubican en las proximidades, por lo que se toman en cuenta para la reconstrucción de la secuencia eruptiva del área. Dichas erupciones presentan una composición que va de andesita basáltica a dacita, siendo esta última predominante. Ahora bien, en cuanto a las tres grandes erupciones propias de este estudio,

los productos menos diferenciados corresponden a Cerro del Agua ($\text{SiO}_2 = 52.7\text{-}57.6\%$ en peso), seguidamente se tiene a Cuatempel, ligeramente más diferenciado ($\text{SiO}_2 = 54.3\text{-}60.0\%$ en peso), quienes presentan composiciones que van de andesita-basáltica (predominantemente) a andesita. Por su parte, Dos Cerros presenta un mayor grado de diferenciación ($\text{SiO}_2 = 56.1\text{-}61.0\%$ en peso), con una composición de andesita basáltica a andesita (predominantemente). Estos datos se presentan junto al resto de las erupciones de manera sintética en la Tabla 8. Es importante mencionar que dentro de la zona de estudio los productos más diferenciados corresponden al volcán Metepec y al Flujo Tlacotenco.

En la misma figura (Figura 28a) se muestra que todos los productos caen dentro del campo subalcalino. Dicho lo anterior, es necesario observar el apartado b de la misma figura, en la cual se presenta la correspondiente afinidad de los productos hacia la serie magmática calcialcalina.

Tabla 8.- Se presenta el rango de % en peso de SiO_2 , campo composicional y su composición predominante para todas las erupciones presentes en la Figura 28a,b.

Nombre del Volcán	SiO_2 % en peso	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	Campo composicional	Composición predominante
Cerro del Agua	52.71-57.58	4.32-5.50	andesita basáltica / andesita	andesita basáltica
Cuatempel	54.34-59.96	3.29-5.51	andesita basáltica / andesita	andesita basáltica
Ocoxusco?	54.90-	3.72-	andesita basáltica	andesita basáltica
Sochol?	54.96-55.63	4.30-4.73	andesita basáltica	andesita basáltica
Dos Cerros	56.09-59.92	5.04-5.99	andesita basáltica / andesita	andesita
La Joya	56.81-58.24	4.74-5.29	andesita basáltica / andesita	andesita
Cilcuayo	56.81-	5.31-	andesita basáltica / andesita	andesita basáltica
Cuajomac	56.80-	5.82-	andesita basáltica / andesita	andesita basáltica
Tapeixte	57.67-60.93	4.75-5.21	andesita basáltica / andesita	
Tenango	57.32-57.73	5.34-5.50	andesita	andesita
Aholo?	57.53-57.94	4.62-5.30	andesita basáltica / andesita	
Tenayo	58.64-	5.69-	andesita	andesita
Metepec	61.65-	5.55-	andesita	andesita
Flujo Tlacotenco	62.77	6.05-	andesita	andesita
Fuentes no Identificadas	56.51-57.50	4.39-5.84	andesita basáltica	andesita basáltica

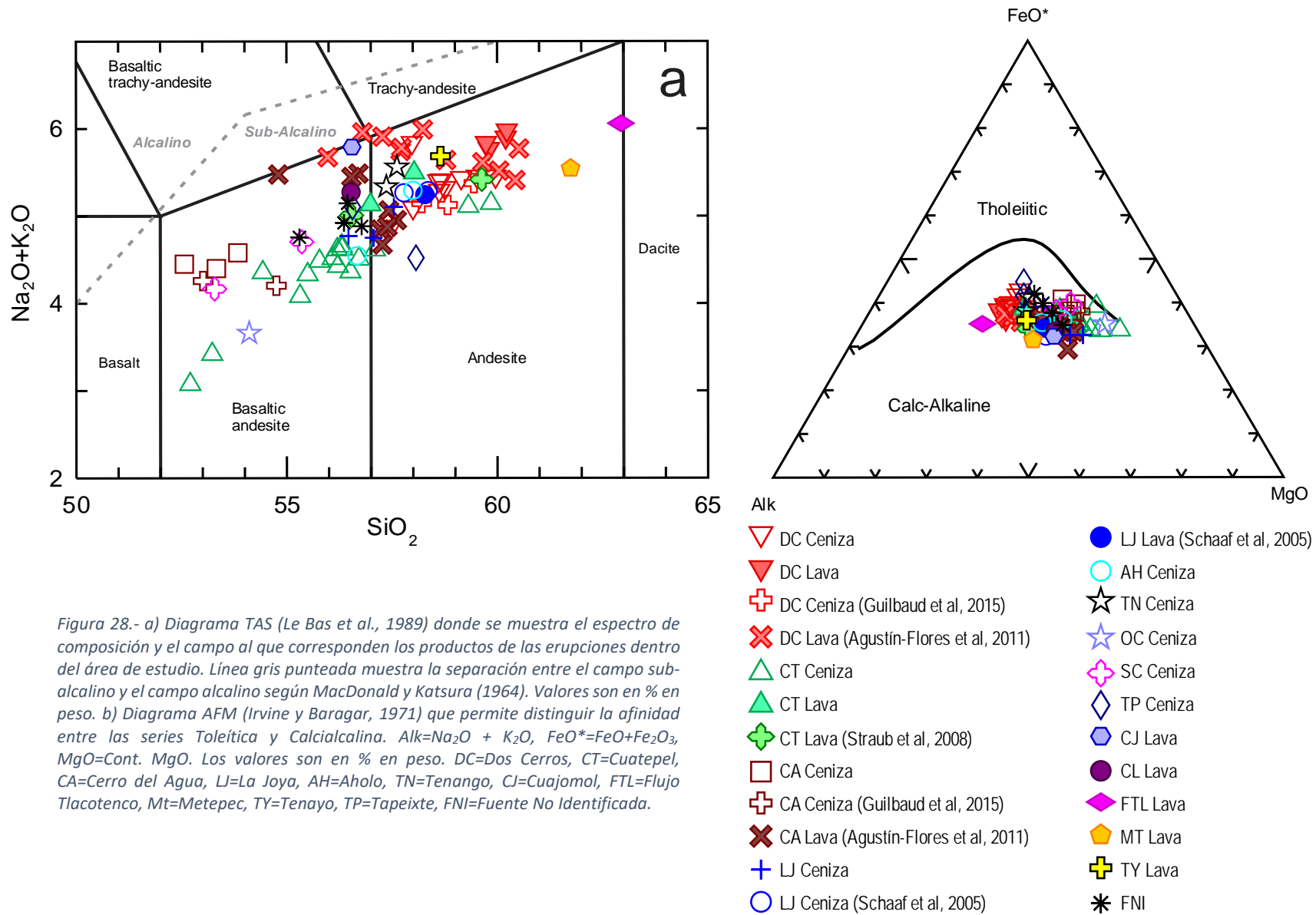


Figura 28.- a) Diagrama TAS (Le Bas et al., 1989) donde se muestra el espectro de composición y el campo al que corresponden los productos de las erupciones dentro del área de estudio. Línea gris punteada muestra la separación entre el campo sub-alcalino y el campo alcalino según MacDonal y Katsura (1964). Valores son en % en peso. b) Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) que permite distinguir la afinidad entre las series Toleítica y Calcialcalina. Alk=Na₂O + K₂O, FeO*=FeO+Fe₂O₃, MgO=Cont. MgO. Los valores son en % en peso. DC=Dos Cerros, CT=Cuatepel, CA=Cerro del Agua, LJ=La Joya, AH=Aholo, TN=Tenango, CJ=Cuajomol, FTL=Flujo Tlacotenco, Mt=Metepec, TY=Tenayo, TP=Tapeixte, FNI=Fuente No Identificada.

Para los elementos mayores y traza se realizaron diagramas de variación “Harker”, diagramas de Tierras Raras “REE” (Rare Earth Elements) y diagramas “Araña” para los últimos. En el caso del #Mg se construyó un diagrama que presenta la variación #Mg con respecto al SiO_2 (Figura 29a), así como con respecto al Ni (Figura 29b), lo que permite observar como el volcán Dos Cerros, grafica en un campo alejado de Cuatempel y Cerro del Agua, que presentan valores más altos en #Mg y Ni.

Los diagramas de Harker de elementos mayores (Figura 30) muestran una correlación negativa con respecto al SiO_2 para el Fe_2O_3 , MnO, MgO, y CaO. Mientras que, para Na_2O se aprecia una correlación positiva. Por su parte, el K_2O presenta dispersión, aunque puede observarse una correlación ligeramente positiva. De igual manera, los valores de TiO_2 presentan dispersión cuando son graficados versus el SiO_2 , aunque para ciertos volcanes (e.g. Cerro del Agua) se observa una correlación negativa. El Al_2O_3 y el P_2O_5 presentan un comportamiento más disperso, sin embargo, se puede apreciar una correlación ligeramente negativa entre ambos cuando se consideran ciertos volcanes (e.g. Cerro del Agua, Dos Cerros, ver abajo). En el caso de Cuatempel, se observa, al contrario, una correlación claramente positiva del P_2O_5 versus el SiO_2 . En el texto siguiente, se describen con mayor detalle las variaciones que se observan dentro de los productos de volcanes específicos.

En el diagrama correspondiente al Al_2O_3 vs SiO_2 , no es posible observar claramente ninguna tendencia o comportamiento, ya que los productos presentan dispersión. Ahora bien, los valores más bajos en Al_2O_3 corresponden a los volcanes Cuajomac, seguido de La Joya y Cilcuayo. A su vez, las mayores abundancias las presentan los volcanes Cuatempel, Cerro del Agua y Tapeixte.

En el diagrama K_2O vs SiO_2 , los valores de Dos Cerros presentan cierta dispersión, las lavas siendo más ricas en K_2O con respecto a las tefras. Esta observación aplica también para Cerro del Agua y Cuatempel, los cuales presentan menores concentraciones en K_2O que Dos Cerros. El contenido más alto en K_2O lo reporta el volcán Cuajomac.

Por su parte, el diagrama de P_2O_5 vs SiO_2 presenta dispersión para los productos de Dos Cerros, una ligera tendencia positiva para Cuatempel y una ligera tendencia negativa para

las tefras distales de Cerro del Agua. Dos Cerros presenta concentraciones mayores que Cuatempel y Cerro del Agua, a su vez, Cuatempel presenta las menores concentraciones en el área, subsecuentemente se encuentran los productos proximales de Cerro del Agua, así como las lavas del Metepec. Los valores más altos corresponden a Cuajomac, Cilcuayo y Tenayo, respectivamente.

El MnO presenta una clara disminución con respecto al SiO₂. Cerro del Agua presenta en general mayores concentraciones que Cuatempel y Dos Cerros, aunque la mayor concentración en MnO la presenta una muestra de tefra de Cuatempel. A su vez, Cuatempel tiene la menor concentración con respecto a los dos anteriores. En estos tres volcanes, las muestras de lava típicamente tienen menores concentraciones en comparación con las de tefra. A su vez, el menor contenido de MnO corresponde a Metepec seguido del Flujo Tlacotenco.

El MgO muestra un decremento conforme el SiO₂ aumenta. Cuatempel presenta mayores concentraciones en general que Cerro del Agua y Dos Cerros, mientras que este último tiene menores concentraciones que los dos anteriores, y Cerro del Agua tiene valores intermedios. En Cuatempel y Cerro del Agua, las lavas tienen menores valores de MgO a mismo valor de SiO₂, mientras que en Dos Cerros lavas y tefras tienen composiciones parecidas. Cuatempel y el Flujo Tlacotenco presentan las concentraciones mayores y menores, respectivamente.

El CaO presenta un claro decremento conforme al aumento de SiO₂. Cuatempel y Cerro del Agua cubren rangos en CaO parecidos, pero siguen una tendencia distinta en la gráfica de CaO versus SiO₂. Las muestras de Dos Cerros cubren un rango menor y los datos se concentran en valores más bajos (6-7 % en peso). El valor más alto corresponde a una Fuente no Identificada seguida del volcán Cilcuayo, por su parte, el menor valor lo presenta el Flujo Tlacotenco, seguido del Metepec.

La variación del Na₂O contra el SiO₂, presenta, en general, una ligera tendencia positiva. Cuatempel presenta menores concentraciones que Cerro del Agua y Cuatempel, estos dos últimos presentan valores similares. La mayor concentración corresponde al Flujo Tlacotenco, mientras que, la menor corresponde a Cuatempel. Contrariamente, el Fe₂O₃ presenta una clara disminución con el aumento de SiO₂ para todos los productos. La mayor

concentración corresponde a Cerro del Agua, a su vez, el menor valor lo presenta el Flujo Tlacotenco.

En el caso del TiO_2 , se observa en general una disminución con respecto al aumento del SiO_2 . Cerro del Agua presenta dos grupos con diferentes abundancias de TiO_2 . Los valores más altos pertenecen a muestras proximales y los más bajos a muestras distales. A su vez, Cuatempel presenta concentraciones menores que Dos Cerros y las muestras distales de Cerro del Agua, mientras que sus valores son parecidos a los depósitos proximales de Cerro del Agua. El valor más alto lo reporta el volcán Tapeixte mientras que el más bajo corresponde al Flujo Tlacotenco seguido de Metepec.

En los diagramas binarios de elementos traza construidos en las figuras 31a,b,c, podemos observar que para los volcanes Cerro del Agua, Cuatempel, Dos Cerros y, en menor grado, La Joya (nótese que los datos analizados para estos volcán), conforman campos muy bien definidos. También es posible observar que el volcán Dos Cerros siempre grafica en campos alejados de Cuatempel y Cerro del Agua y es el más peculiar en cuanto a su composición en elementos traza.

En el diagrama Nb vs K_2O , es posible observar que los volcanes cubren campos distintos. Cerro del Agua y Dos Cerros cubren un rango parecido en Nb pero Cerro del Agua es más bajo en K_2O . A su vez, Cuatempel tiene concentraciones más bajas en Nb, en comparación con Dos Cerros y Cerro del Agua. El diagrama Nb vs Zr, permite observar que Cuatempel presenta concentraciones en Zr menores que Dos Cerros y Cerro del Agua. Para el caso del diagrama Ba vs Nb, se aprecia que Cuatempel comparte valores similares de Ba con respecto a Cerro del Agua. Por su parte, Dos Cerros, presenta mayores concentraciones de Ba con respecto los dos anteriores. El valor más alto en Ba corresponde al volcán Cuajomac seguido de Cilcuayo. En cuantos a otros elementos graficados en la Figura 31a, Dos Cerros tiene valores más altos de Th, La y Ba/Sr con respecto a los otros dos volcanes, y Cerro del Agua se distingue de Cuatempel por tener valores más altos en Sr.

Seguidamente, para el caso de los volcanes Dos Cerros y Cuatempel, debido a que se cuenta con un número importante de datos químicos sobre las tefras, se construyeron diagramas de variación elemental con respecto a la distancia de la fuente, así como dentro de la secuencia tipo utilizando el Mg#, Ni y Sr (Figura 32). Los datos del volcán Dos Cerros

muestran una clara disminución de Mg# y Ni, y aumento de Sr con un incremento en la distancia. En comparación, los datos de Cuatempel muestran mucha dispersión en Mg# y Ni dentro de la misma secuencia que aparentemente superan las variaciones con la distancia, pero presentan una ligera tendencia de decremento en Sr con respecto a la distancia.

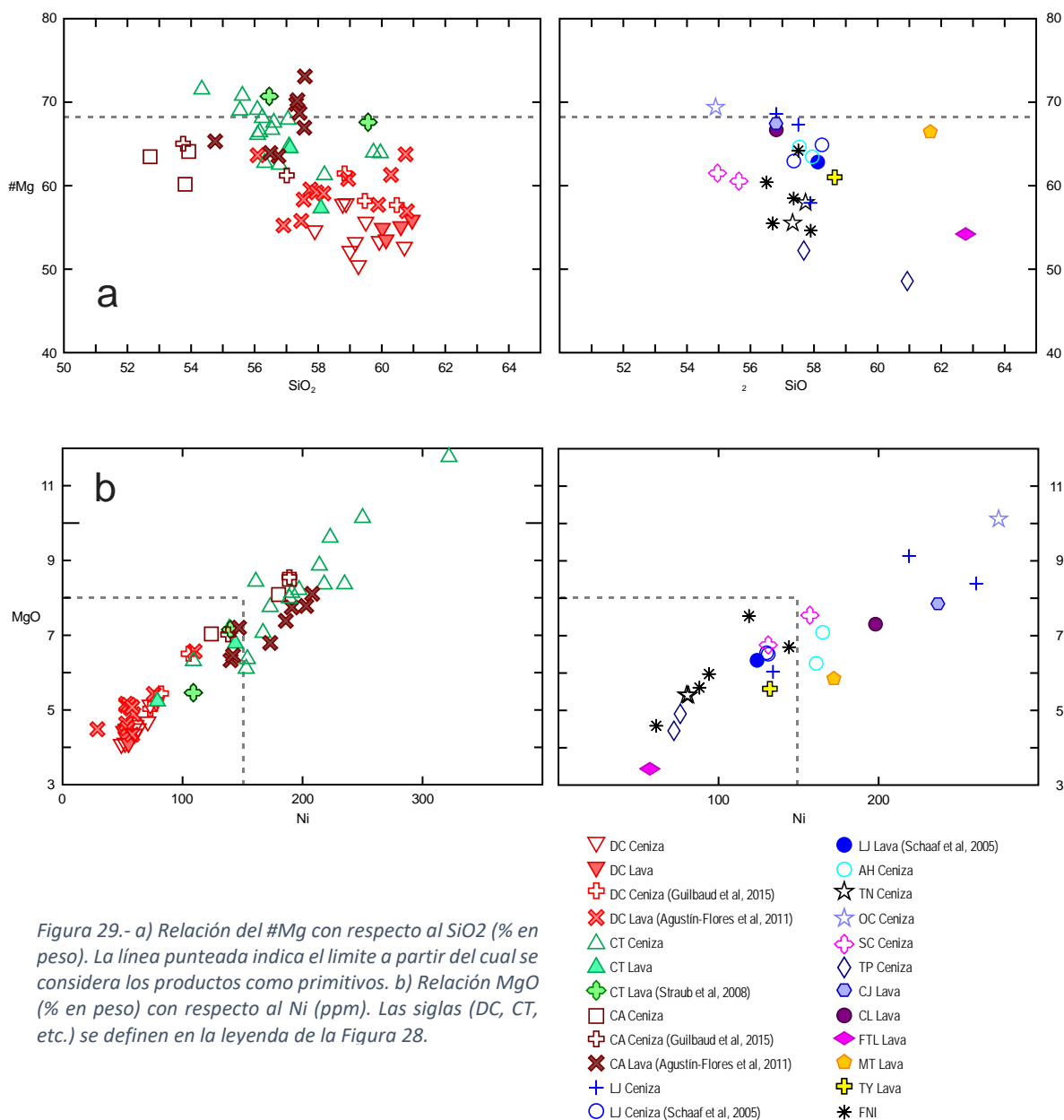


Figura 29.- a) Relación del #Mg con respecto al SiO₂ (% en peso). La línea punteada indica el límite a partir del cual se considera los productos como primitivos. b) Relación MgO (% en peso) con respecto al Ni (ppm). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la leyenda de la Figura 28.

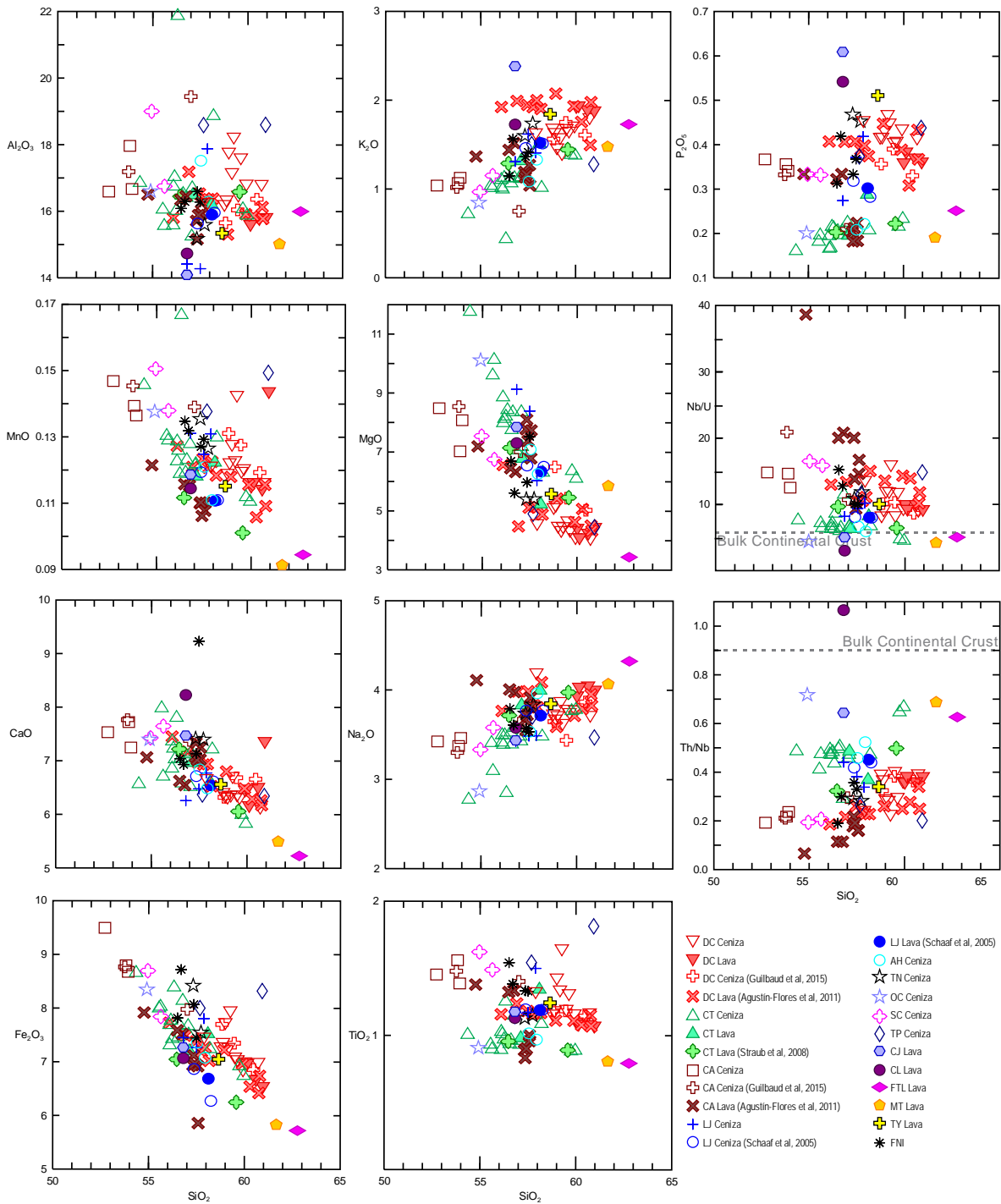


Figura 30.- Diagramas binarios de elementos mayores (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MnO , MgO , TiO_2 , CaO , Na_2O , P_2O_5) vs SiO_2 (% en peso). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la leyenda de la Figura 28.

Capítulo III

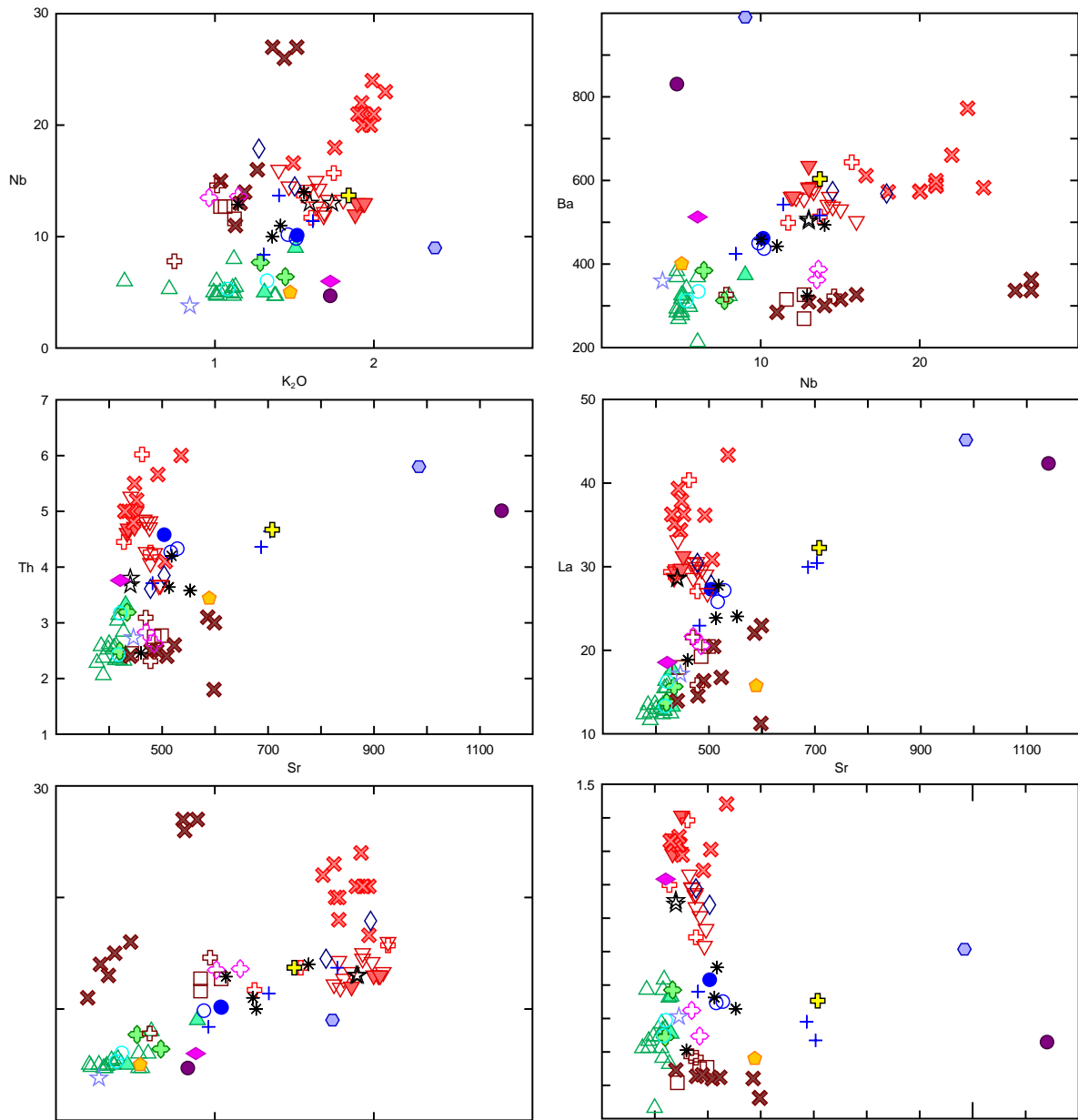


Figura 31a.- Diagramas binarios de variación de elementos traza (en ppm) para todos los datos. Los símbolos se definen en la Figura 28.

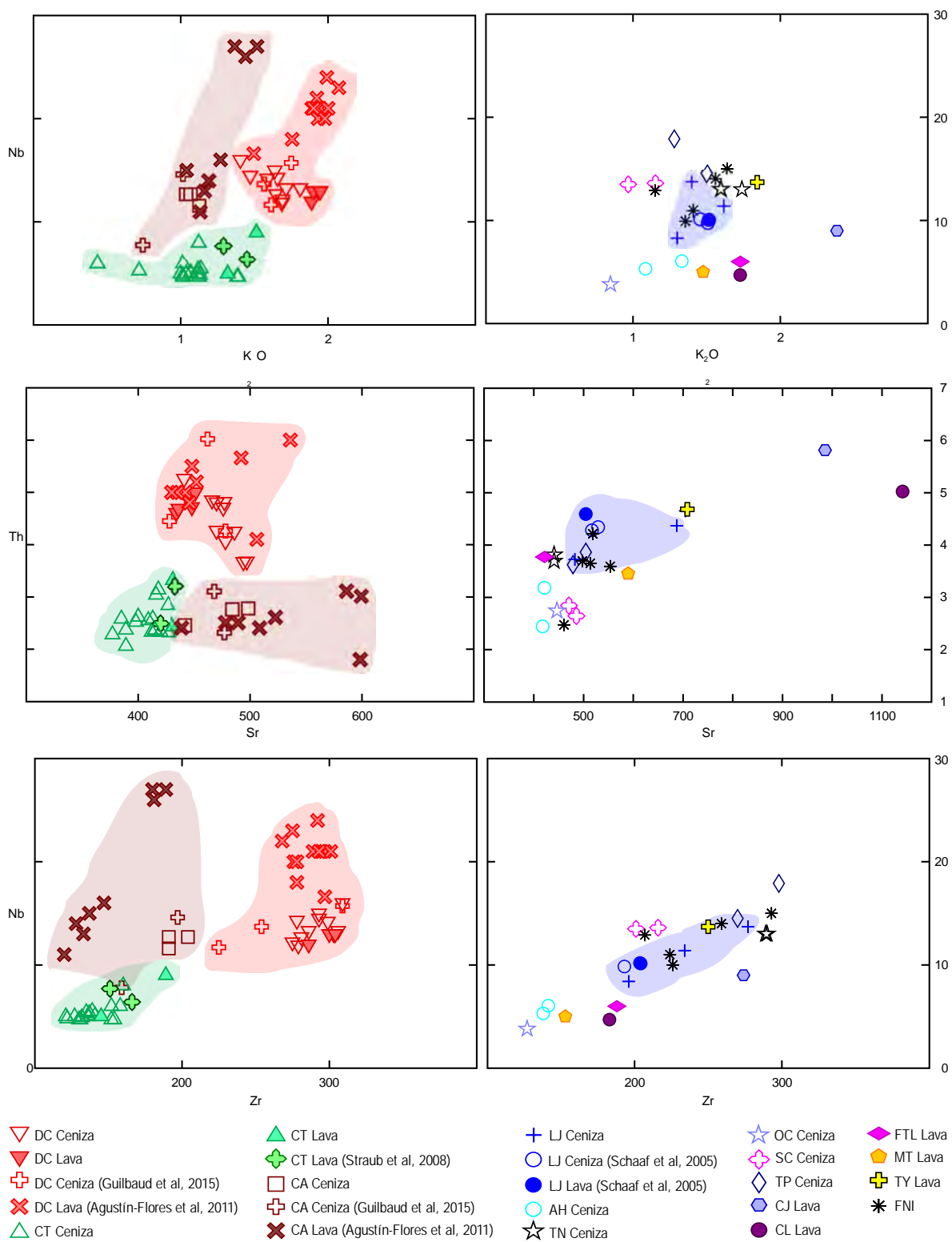


Figura 31b.- Diagramas binarios de variación de elementos traza (en ppm), en donde se muestran los campos que grafican los volcanes Cerro del Agua, Cuatempel y Dos Cerros (columna izquierda), así como el resto de los datos y el campo que gráfica el volcán La Joya (columna derecha). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la Figura 28.

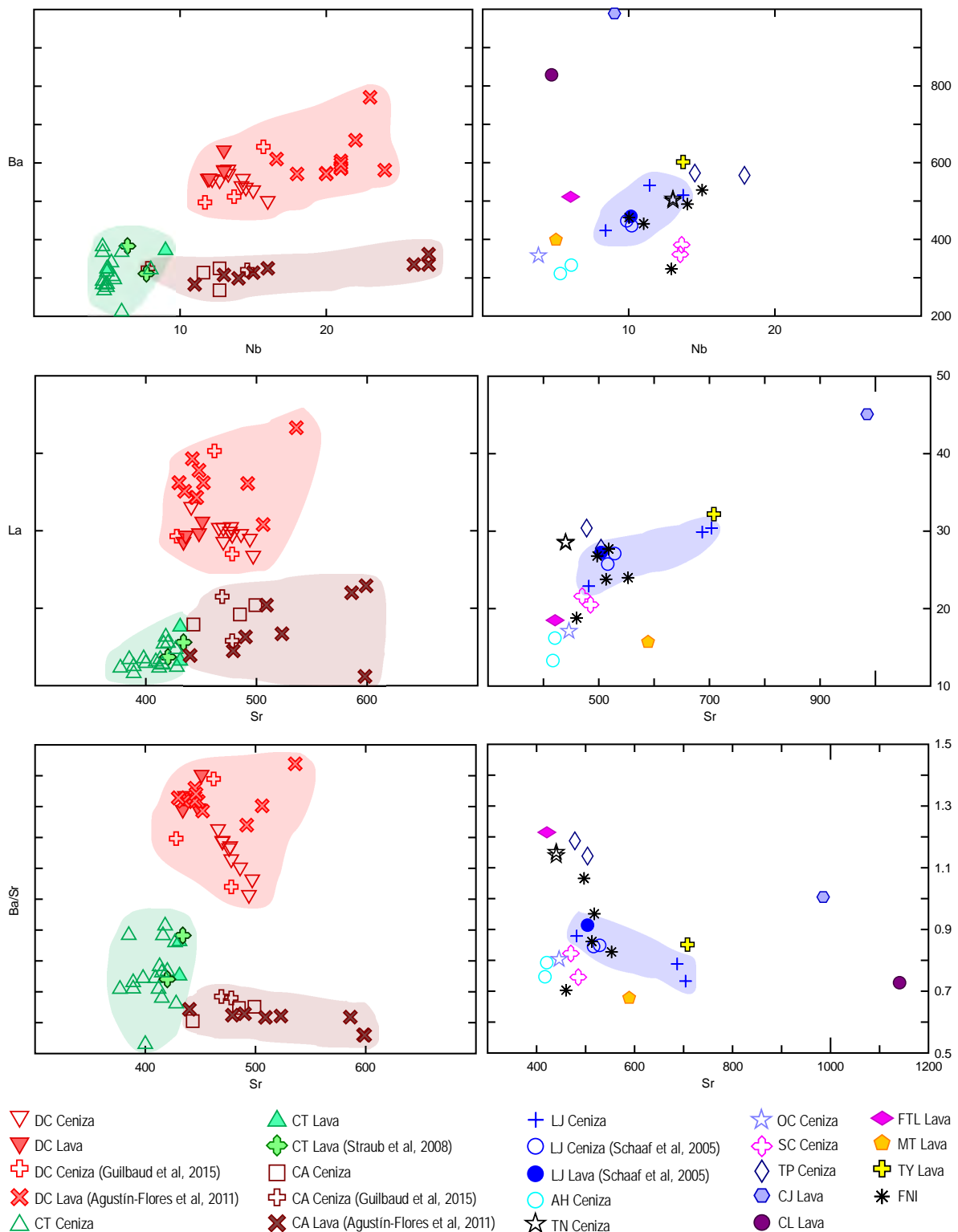


Figura 31c.- Diagramas binarios de variación de elementos traza (en ppm), en donde se muestran los campos que grafican los volcanes Cerro del Agua, Cuatempel y Dos Cerros (columna izquierda), así como el resto de los datos y el campo que gráfica el volcán La Joya (columna derecha). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la Figura 28.

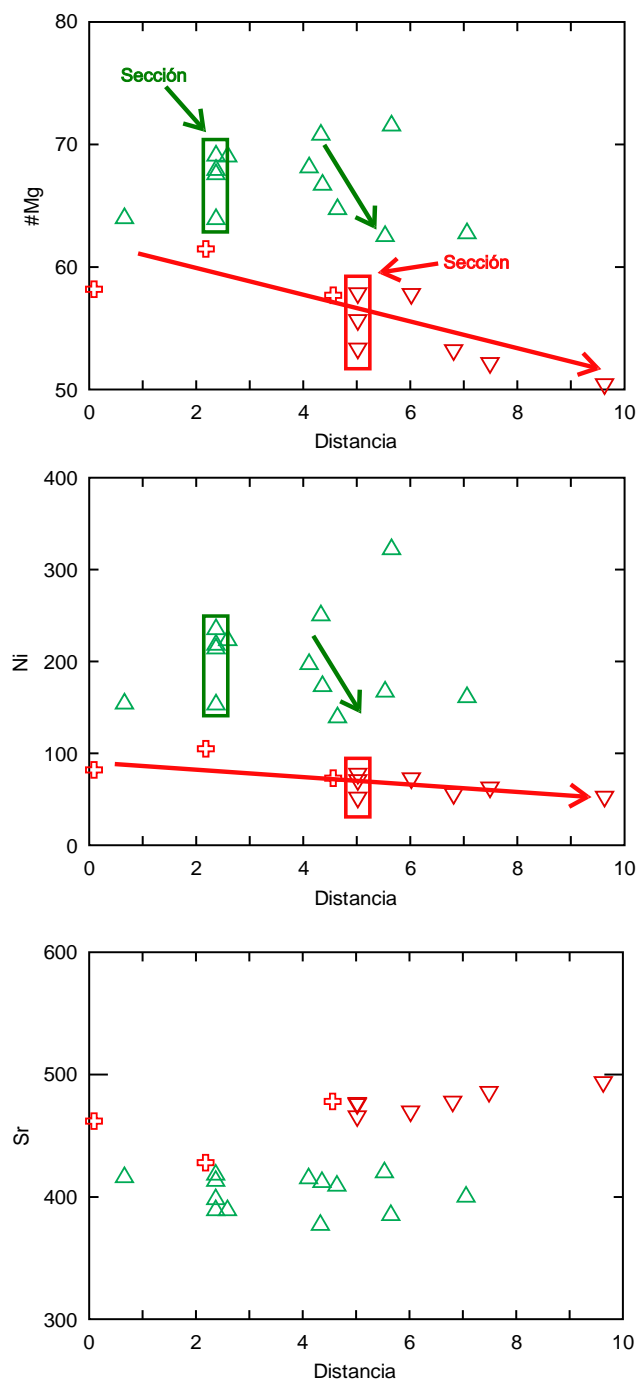


Figura 32.- Diagramas que muestran Mg#, Ni (ppm), y Sr (ppm) de las tefras con respecto a la distancia al centro de emisión, así como dentro de la secuencia tipo para los volcanes Dos Cerros (rojo) y Cuatapel (verde).

el caso de Dos Cerros, solamente una muestra presenta concentraciones en elementos HREE tan bajas como en los otros volcanes, la cual corresponde a una muestra anómala reportada por Agustín-Flores y colaboradores (2011), que se desestimó y aquí no se

Los diagramas de REE y elementos traza (Figura 33a,b, respectivamente) evidencian que todos los productos, en lo general, presentan tendencias similares, tales como evidentes anomalías positivas en Pb, además de anomalías negativas en Nb y Ta. En los patrones de REE normalizados a condrita (Sun y McDponough, 1989; Figura 36a), es posible observar que todos los productos presentan una pendiente negativa, la pendiente más suave correspondiente a Cuatapel, con pendientes progresivamente más pronunciadas siguiendo el grado de diferenciación de los productos. El patrón de los productos de Cerro del Agua es similar a Cuatapel pero con un ligero enriquecimiento en LREE y similares abundancias en los HREE. Siguiendo dicho orden progresivo, se tienen los productos del volcán La Joya, los cuales se presentan mayor enriquecimiento en LREE con respecto a los dos anteriores, sin embargo, las abundancias de los HREE, son similares a los anteriormente descritos. Por último, se tienen los productos de Dos Cerros, los cuales presentan el mayor enriquecimiento de LREE y HREE. Es necesario mencionar que, en

presenta. Hecha la aclaración y observando el comportamiento de los productos de Dos Cerros, es posible identificar que los valores mínimos para el resto de los datos correspondientes a los HREE, son similares a los de Cerro del Agua y Cuatapel, sin embargo, alcanza los valores más altos de todos. En resumen, los “miembros extremos” en cuanto a concentraciones en elementos traza son Cuatapel y Dos Cerros, y se nota además que, en el orden sucesivo de Cuatapel, Cerro del Agua y Dos Cerros, se observa un comportamiento general de enriquecimiento en los LREE con respecto a los HREE, con un aumento de las pendientes de los patrones. No se observa anomalía de Eu.

Los diagramas de elementos traza normalizados al manto primitivo (Figura 32b) muestran un comportamiento general similar en cuanto a la progresión anteriormente descrita, con el mismo orden de enriquecimiento y “miembros extremos”. Se observan marcadas anomalías negativas de Nb y Ta, así como picos negativos más pequeños en Ce, Th, Rb, Ti y P. A su vez, se observa una anomalía positiva muy marcada en Pb, así como picos positivos más pequeños en Ba, U, K, Sr y Zr. Cabe mencionar que Cerro del Agua presenta valores de Pb, Nb y Ta similares a los de Dos Cerros.

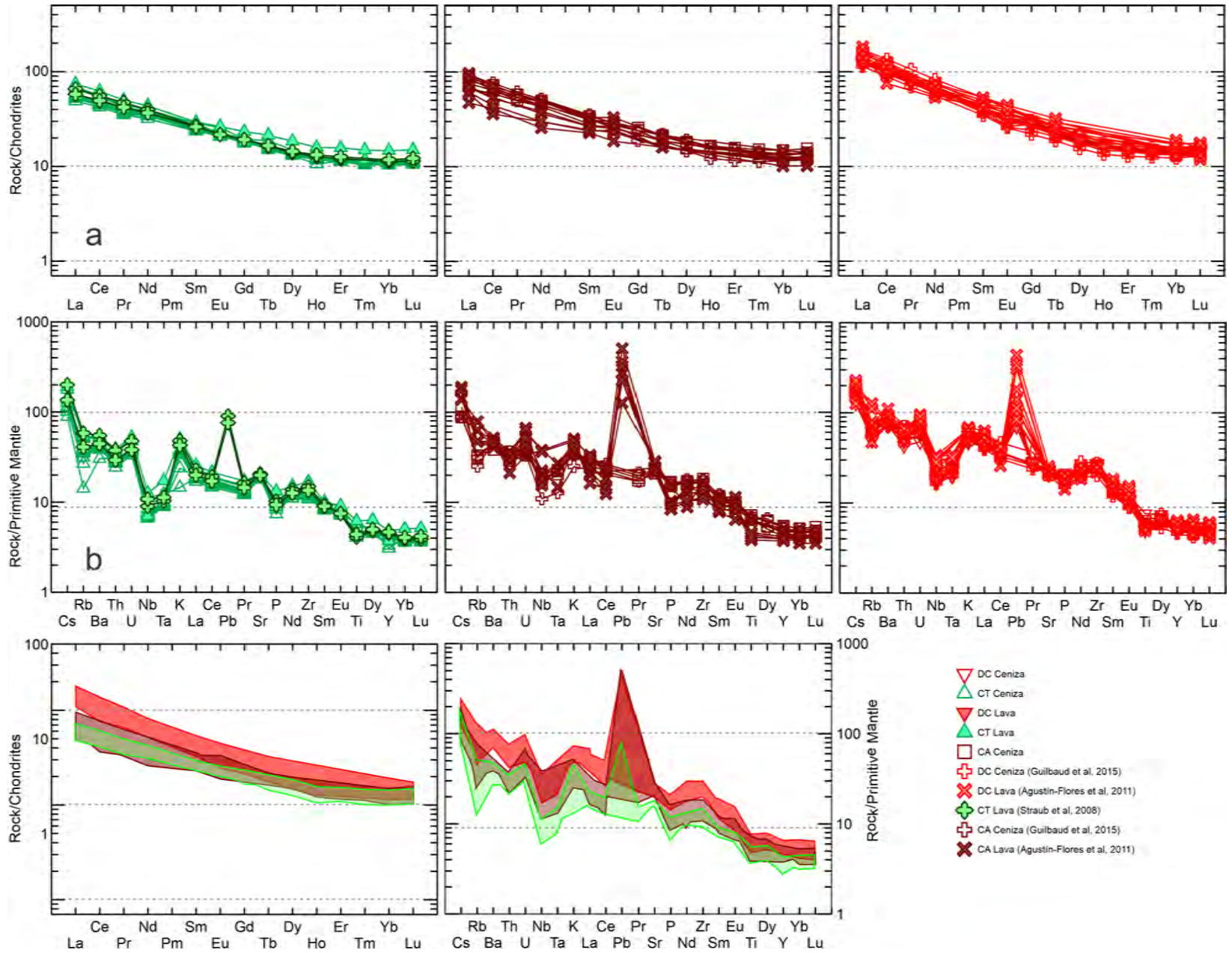


Figura 33.- a) Diagramas de Tierras Raras (REE por sus siglas en inglés) normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989). b) Diagramas de elementos traza (diagramas de araña) normalizados al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la Figura 28.

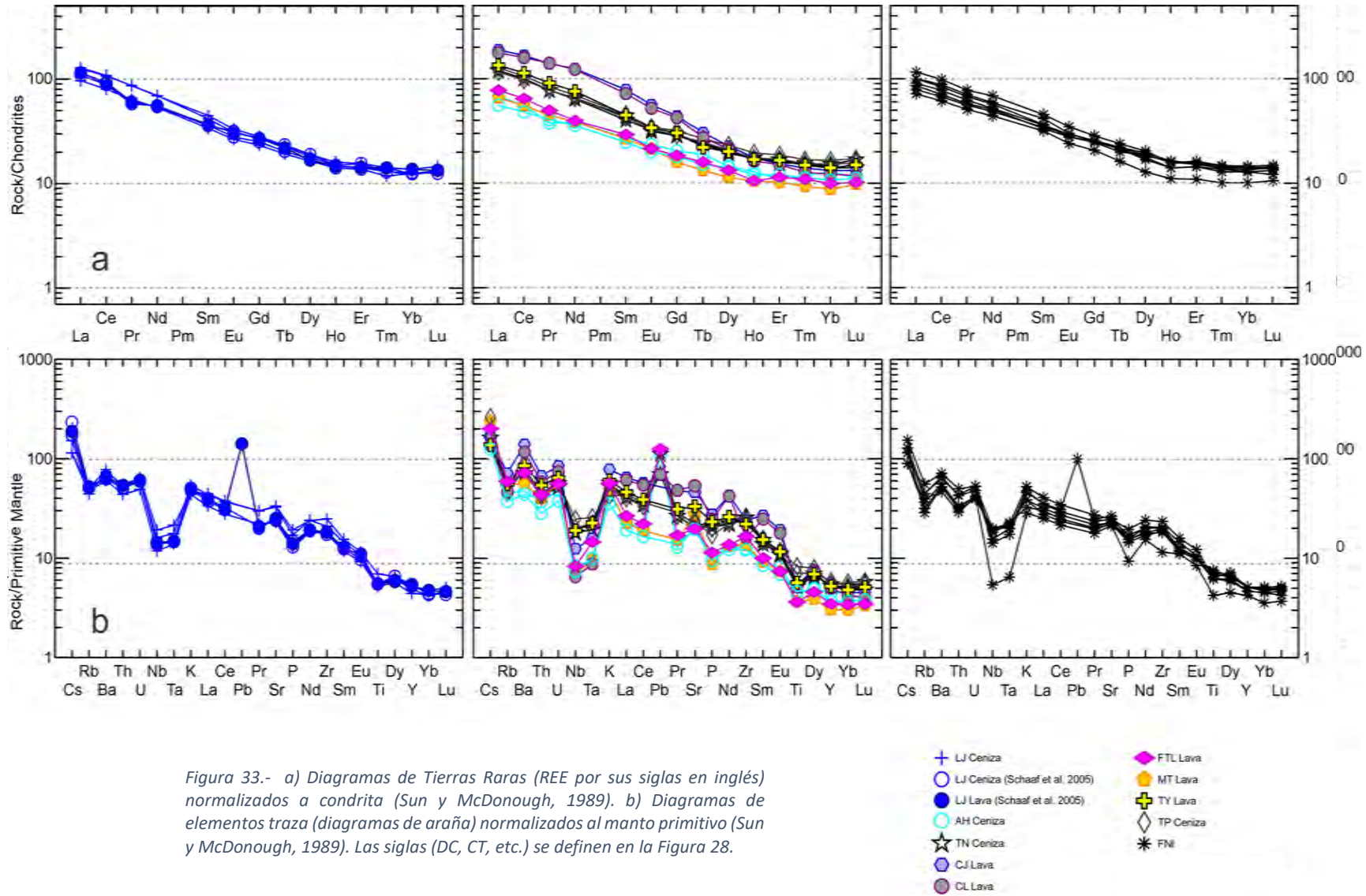


Figura 33.- a) Diagramas de Tierras Raras (REE por sus siglas en inglés) normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989). b) Diagramas de elementos traza (diagramas de araña) normalizados al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). Las siglas (DC, CT, etc.) se definen en la Figura 28.

CAPITULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

4.1 ACTIVIDAD VOLCÁNICA RECIENTE EN SECTOR ORIENTAL DEL CVSC: RECONSTRUCCIÓN DE LA SECUENCIA DE EVENTOS DENTRO DEL AREA DE ESTUDIO

El trabajo presentado en esta tesis aporta nuevos datos sobre la actividad volcánica que caracteriza a la parte oriental de la CVSC. Nuestros resultados muestran que esta actividad formó principalmente flujos de lava asociados a conos de escoria, de los cuales se tienen tres erupciones mayores durante los últimos 30,000 años (16,300 A.P. Cerro del Agua, 18,500 A.P. Dos Cerros y 27,700 A.P. Cuatepel). Dentro del área de estudio fue posible definir, mediante cartografía, estudios estratigráficos y fechamientos por radiocarbono que al menos 18 erupciones ocurrieron durante los últimos 40,000 años (Figura 34), lo cual permite calcular una tasa promedio de recurrencia aproximada de 2,222 años. Sin embargo, es necesario mencionar que se identificaron un total de 71 volcanes por lo que existe una alta probabilidad de que dicha tasa se reduzca en futuros trabajos que permitan definir edades para los volcanes que aún no han sido fechados. Esta tasa es similar con la de 1,923 años reportada por Siebe y colaboradores (2005) para el sector central del campo (tomando en cuenta solo erupciones monogenéticas), la cual se calculó para los últimos 25,000 años. Si se toman en cuenta ambos sectores y se determina la tasa de recurrencia para los últimos 40,000 años (27 volcanes) el valor que se obtiene es de 1,481 años. Tomando en cuenta las erupciones más recientes del CVSC (el volcán Xitle en 1,600 años A.P. y Chichinautzin en 1,800 años A.P., Siebe, 2000 y Siebe et al., 2004a), es posible observar que dicha tasa de recurrencia se ha sobrepasado. A su vez, es necesario mencionar que no es posible observar una regularidad temporal al separar las erupciones tanto en el sector oriental (Figura 34), como en el sector central (Siebe et al. 2005). Esto puede deberse a la falta de datos, en particular para el periodo de 30,000-40,000 años. En todo caso, se puede afirmar que el CVSC es un campo potencialmente activo debido a que presenta varias erupciones recientes y el riesgo asociado no ha sido considerado hasta el momento para la planeación urbana en el área.

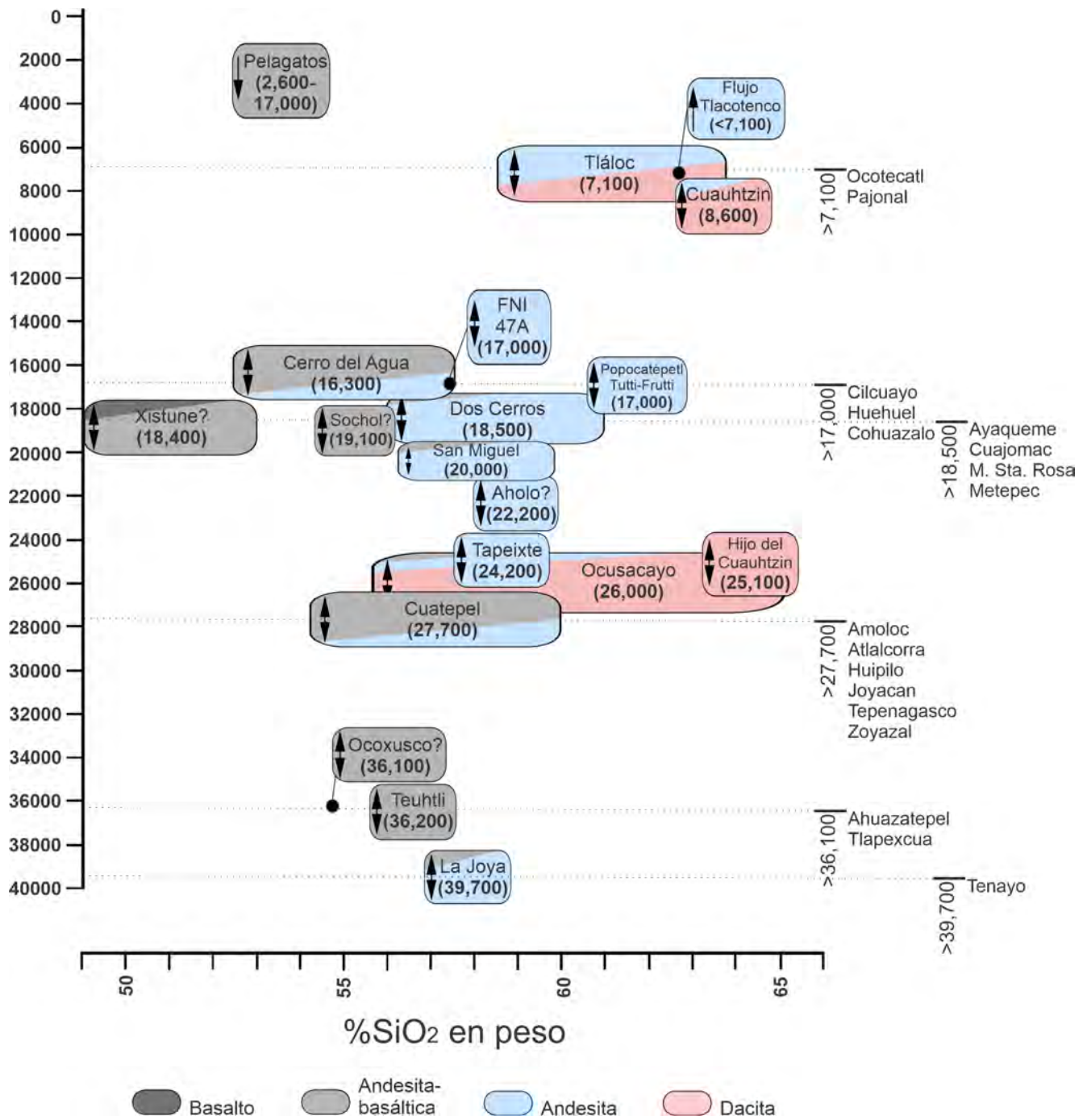


Figura 34.- Reconstrucción de la secuencia de los eventos eruptivos dentro del área de estudio. FNI=Fuente no identificada. Las edades son convencionales, promediadas y redondeadas, además, nótese al margen derecho los eventos con edades relativas mínimas. También, se presentan las variaciones del % de SiO₂ en peso para las diferentes erupciones.

Es importante considerar el riesgo asociado con la posible reanudación de la actividad volcánica en el campo. Los conos de escoria son las estructuras predominantes dentro del CVSC, y están en general relacionadas a actividad explosiva principalmente de tipo estromboliana, además de poder presentar fases efusivas (Valentine y Gregg, 2008), aunado a esto se presenta la variabilidad composicional de basaltos a dacitas, lo que en las composiciones intermedias y de mayor contenido en sílice permiten desarrollar un mayor grado de explosividad en este tipo de volcanes (Wallace y Carmichael, 1999; Parfitt y Wilson, 2008), que si bien no pueden compararse con los grandes estratovolcanes se tiene que tomar en cuenta la cercanía del CVSC al área metropolitana más grande del país, lo que conlleva un alto riesgo para la población (Francis y Oppenheimer, 2004).

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE LAS TRES ERUPCIONES PRINCIPALES

En el caso de las tres grandes erupciones estudiadas, se delimitó el alcance máximo de los flujos de lava con respecto a su fuente, y se dibujaron mapas de isopacas para los dos volcanes con mayores datos de espesor de tefra, que son Dos Cerros (Figura 35) y Cuatepel (Figura 36). Observamos que existe una correlación entre el contenido de sílice del magma y la topografía con la dirección principal de emplazamiento y la geometría de los flujos de lava. También, la composición del magma puede influenciar la intensidad de la erupción y la distancia alcanzada por las cenizas. La erupción que produjo flujos de lavas que alcanzaron una mayor distancia con respecto a la fuente fue el volcán Cuatepel (11 km), lo cual puede estar asociado a su composición menos silícica, que a su vez baja la viscosidad de la lava. Por su parte, Dos Cerros presenta espesores de lava más importantes, además de las mayores distancias alcanzadas en sus tefras (12 km). Esto es concordante con su composición con mayor contenido de sílice, ya que puede estar relacionado a una actividad estromboliana violenta, que desarrolla una columna que alcanza mayor altura, lo que permite una mayor dispersión de sus tefras (MacDonald, 1972; Pioli et al., 2008; Lorenzo-Merino et al., 2018). El volcán Dos Cerros presenta dos conos de escoria coronando un escudo de lava, sin embargo, el último evento que puede observarse en la erupción de este volcán, es un flujo de lava que emana de uno de los conos, teniendo así, actividad tanto efusiva como explosiva, que termina con un evento efusivo, es decir que comparte características fundamentales del estilo descrito como estromboliano violento

(Pioli et al., 2008). Es interesante comparar nuestras estimaciones de volúmenes de erupciones con las que fueron anteriormente publicadas. Existe un cálculo de volumen para Dos Cerros, realizado por Agustín-Flores y colaboradores (2011) en el que se estima que esta erupción emitió alrededor de 1.25 km^3 de lavas que cubren 80.3 km^2 , lo cual es menor a nuestras cifras (83.9 km^2 , 3.4 km^3) que son más cercanos a las estimadas para el Pelado (5.2 km^3 , con un área de 101.7 km^2 ; Lorenzo-Merino et al., 2018). Seguidamente Agustín-Flores y colaboradores (2011) estiman para Cerro del Agua un volumen de 0.27 km^3 y un área para las lavas de 17.68 km^2 (18.2 km^2 en este estudio), con un volumen de 0.24 km^3 . En este estudio, las lavas del volcán Cerro del Agua cubren un área de 18.2 km^2 con un espesor promedio de 17 m, obteniendo un volumen de 0.32 km^3 . Nuestros valores son más altos ya que usamos un modelo digital de terreno de alta resolución que permitió redefinir las áreas cubiertas por lavas que resultaron más amplias que lo establecido previamente.

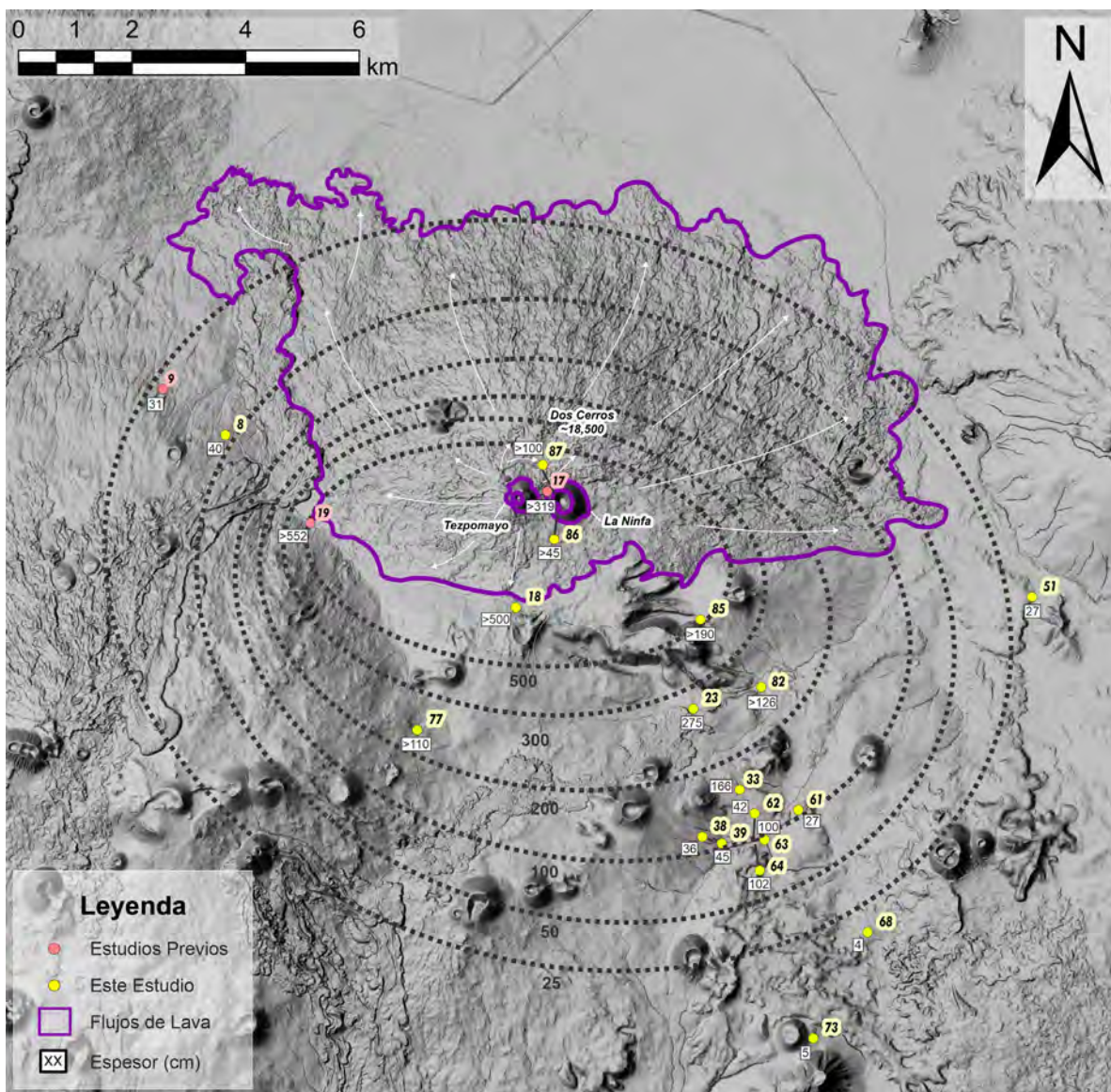


Figura 35.- Isopacas para los productos piroclásticos de caída de Dos Cerros.

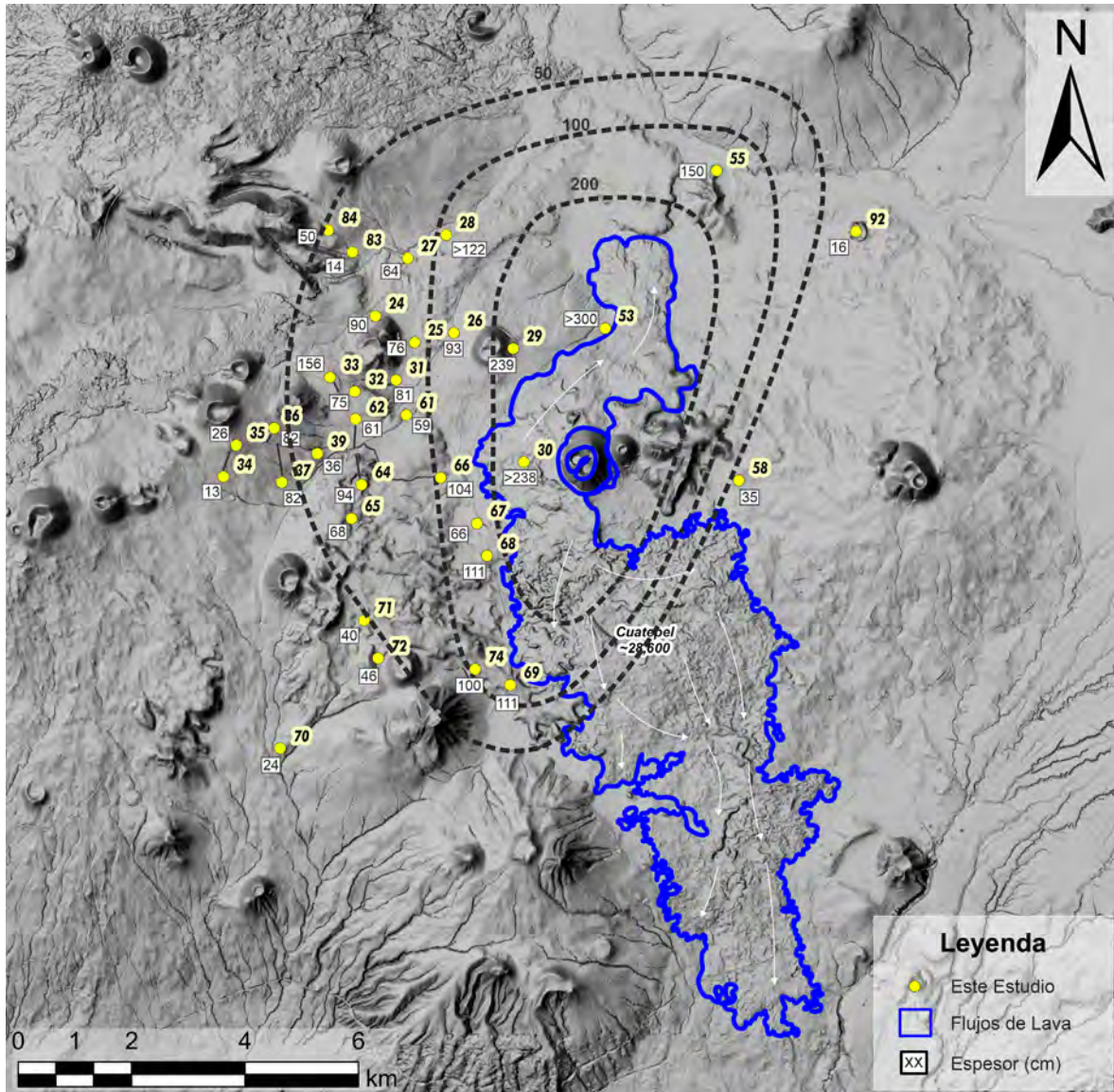


Figura 36.- Isopacas para los productos piroclásticos de caída de Dos Cerros.

Las tres erupciones presentan características diferenciables en sus depósitos de ceniza que se pueden interpretar en términos de variaciones en la actividad explosiva. Macroscópicamente, el volcán Dos Cerros se presenta como una secuencia monótona en cuestión tanto de granulometría como en la proporción de cristales y vesículas, mientras que las secuencias típicas de Cuatapel y Cerro del Agua presentan variaciones importantes en los mismos parámetros (descritas en 3.2 y 3.4). En Cuatapel, el contenido de cristales disminuye hacia la parte alta de la secuencia, así como la vesicularidad y el tamaño de clastos. En Cerro del Agua, existe también una disminución sistemática en el tamaño de los clastos y vesicularidad de la base a la cima. De estas observaciones se puede definir que la actividad explosiva de Dos Cerros se presentó de manera más constante en términos de intensidad de la actividad eruptiva, sin grandes variaciones en intensidad de fragmentación del magma, a diferencia de lo que si sucede con Cerro del Agua y Cuatapel. Estas dos últimas erupciones, presentan una disminución en el tamaño de grano y la vesicularidad de los clastos que es de manera progresiva dentro de la secuencia. Esto podría apuntar a una baja en la intensidad explosiva con respecto al tiempo.

En la Figura 37a,b,c, se reportan las variaciones químicas presentes en las muestras de las secuencias tipo con respecto a su posición estratigráfica. Allí se observa que, de igual manera a las variaciones sedimentológicas presentadas anteriormente, el volcán Dos Cerros presenta una composición química total muy homogénea dentro de la secuencia, sin embargo, se encontraron variaciones significativas dentro de la secuencia del volcán Cuatapel y algunas variaciones en Cerro del Agua. Estas variaciones indican un incremento en el grado de evolución del magma durante estas erupciones. Entonces, se especula que las variaciones en la composición del magma emitido durante cada una de estas erupciones pueden haber tenido consecuencias sobre la intensidad de la actividad explosiva, la cual se refleja en los cambios texturales y granulométricos observados.

Las cenizas de estas tres erupciones también presentan diferencias en composición modal y geoquímica de roca total. Dos Cerros presenta la mayor proporción modal en vidrio y matriz, y entonces menor contenido en cristales. El mayor contenido en fenocristales y micro fenocristales corresponde a Cuatapel, mientras que el de vesículas a Cerro del Agua. Se observa la presencia de inclusiones de apatito en todos los productos de Dos Cerros y solamente en los productos más diferenciados de Cuatapel y Cerro del Agua. En cuanto a

las características geoquímicas, se observa que Dos Cerros es predominantemente de composición andesítica mientras que Cerro del Agua y Cuatepel corresponden a una composición de andesita-basáltica. El volcán Dos Cerros presenta las menores concentraciones de MgO, Ni y #MgO y las mayores en SiO₂, P₂O₃, K₂O, Zr, Th, y La, con respecto a Cuatepel y Cerro del Agua. A su vez, Cerro del Agua presenta las mayores concentraciones de Nb, Sr y las menores en La y Th, mientras que el volcán Cuatepel presenta las menores concentraciones en K₂O, Sr, Nb, Ba, y Zr. Seguidamente, Dos Cerros presenta las mayores concentraciones de REE y elementos traza.

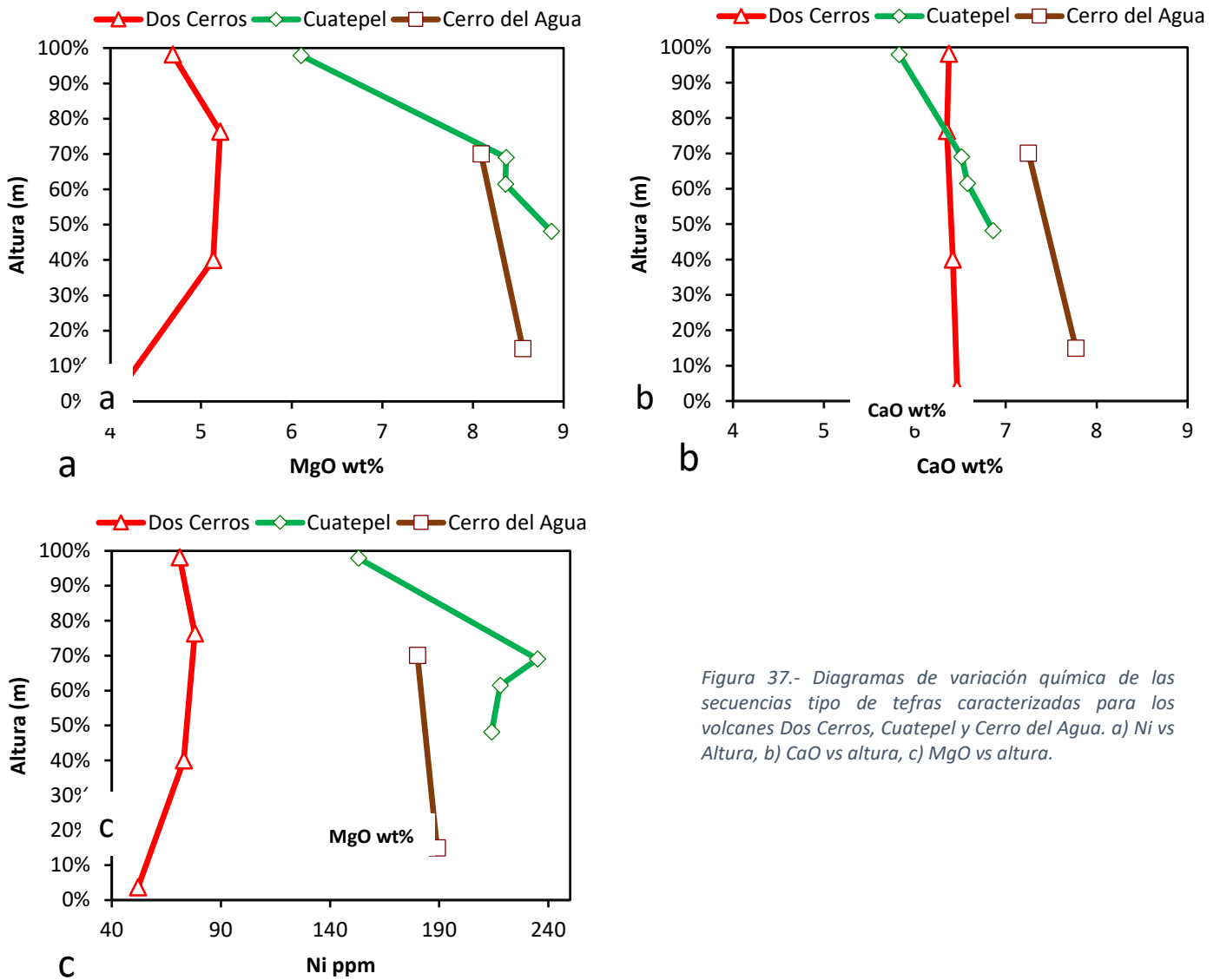


Figura 37.- Diagramas de variación química de las secuencias tipo de tefras caracterizadas para los volcanes Dos Cerros, Cuatepel y Cerro del Agua. a) Ni vs Altura, b) CaO vs altura, c) MgO vs altura.

4.3 IMPLICACIONES DE LOS NUEVOS DATOS QUIMICOS PARA ESTUDIAR EL ORIGEN DE LOS MAGMAS INTERMEDIOS EN EL CVSC

El origen de las composiciones intermedias es uno de los grandes problemas por resolver en el magmatismo de arco. Inicialmente se ha considerado que los magmas andesíticos son derivados de un proceso de cristalización fraccionada a partir de un magma basáltico (Gill, 1981; Tatsumi, 1989). Sin embargo, otros autores sugieren que los magmas andesíticos se originan en regiones de MASH (Melting, Assimilation, Storage, Homogenization) ubicadas en la base de la corteza continental, en donde magmas basálticos de origen mantélico se estacionan por flotabilidad, sufriendo un proceso complejo de asimilación cortical, homogenización y cristalización fraccionada (Hildreth y Moorbath, 1988). Por su parte, otros proponen que la fusión parcial directa de una cuña del manto en condiciones altamente hidratadas puede generar andesitas con características petrológicas de magmas primarios (Blatter y Carmichael, 2001; Grove et al., 2003; Blatter et al., 2007; Mukasa et al., 2007).

La mayoría de los productos del CVSC reportados por diversos autores es de composición intermedia (Wallace y Carmichael, 1999; Arana-Salinas, 2004; Siebe et al., 2004b; Guilbaud et al., 2009, 2015; Agustín-Flores, 2011; Lorenzo-Merino, 2018). Wallace y Carmichael (1999) mencionan que algunos de estos presentan características primitivas, a pesar de su relativamente alto contenido de SiO_2 (> 50% en peso; Wallace y Carmichael, 1999; Verma, 2000; Siebe et al., 2004, Schaaf et al., 2005). Varias hipótesis han sido propuestas para explicar este rasgo, incluyendo la cristalización fraccionada de olivino con inclusiones de cromitas, indicativo de un fraccionamiento incompleto (Wallace y Carmichael, 1999; Siebe et al., 2004b; Schaaf et al., 2005). Otros proponen una relación directa con un manto metasomatizado o un alto grado de fusión de un cúmulo máfico en la base de la corteza inferior (Velasco-Tapia y Verma, 2001), mientras existen experimentos de fusión en peridotita saturada en agua, que dan como resultado andesitas con un alto contenido en MgO (Hirose, 1997).

Algunos de los productos de los volcanes Cerro del Agua y Cuatempel, presentan muestras que tienen afinidad con magmas primitivos ($\#Mg > 68$, $MgO > 8\%$ en peso, $Ni > 150$ ppm; Wallace y Carmichael, 1999), lo cual indica que son derivados de la fusión parcial de una

fuelle peridotítica (Groove, 2000) y que no han sufrido extensos procesos asimilación o mezcla. Sin embargo, los magmas primitivos que contienen de 8 a 10 % en peso de MgO, no representan magmas primarios, sino que, se explican a través de un ligero fraccionamiento de olivino (Wallace y Carmichael, 1999). A su vez, la presencia de cromitas como inclusiones, es típica de magmas relativamente primitivos que no han sido objeto de un fraccionamiento significativo de clinopiroxeno (Roeder, 1994). En comparación, los productos del volcán Dos Cerros tienen un menor contenido de MgO y valores mayores de SiO₂, lo cual sugiere que los magmas emitidos hayan sufrido procesos más extensos de diferenciación. Por otro lado, las variaciones importantes en la concentración de elementos traza entre los tres volcanes, y su falta de correlación con el SiO₂, puede deberse a heterogeneidades en la fuente, posiblemente sea resultado de diferentes grados de fusión parcial de una cuña del manto variablemente metazomatizada por los fluidos de la placa en subducción (Grove et al., 2003; Blatter y Carmichael, 2001; Blatter et al., 2007; Mukasa et al., 2007). Esto es consistente con el régimen tectónico existente, ya que la geometría de la placa en subducción promueve su deshidratación (Gutscher et al., 2000; Maury et al., 2003). Las variaciones que se observan aquí en los volcanes cercanos confirman las observaciones de Siebe y colaboradores (2004b) que han propuesto que las heterogeneidades en el manto son menores a 1km en el CVSC.

Para el caso del TiO₂, Cuatempel tiene predominantemente valores <1 % en peso, a su vez Dos Cerros presenta valores >1 % en peso, mientras que Cerro del Agua, forma grupos en ambos campos, sin una correlación clara con el SiO₂. En primera instancia, esto nos permite deducir que el Dos Cerros no se relaciona cogenéticamente con el volcán Cuatempel, ya que es incoherente que la evolución del magma que dio origen al volcán Cuatempel (menor contenido TiO₂) pueda tener una evolución directa hacia Dos Cerros (mayor contenido de TiO₂) por cristalización fraccionada de baja presión de óxidos de Ti. Ahora bien, Cerro del Agua tiene valores en los dos campos, pero sin una aparente correlación con SiO₂, lo cual sugiere la erupción en este volcán de dos lotes de magmas con un origen distinto. Cabe mencionar que estas concentraciones de TiO₂ >1 % en peso son típicas de rocas máficas alcalinas de intraplaca tales como provincias de cuencas y sierras, así como de regiones asociadas a puntos calientes (Wilson, 1989), sin embargo, nuestros productos tienen una ineludible firma de la componente de subducción, por lo que las concentraciones de Ti pueden ser explicadas, a través de una fuente heterogénea, metazomatizada, con niveles

de hidratación y contenido Ti diferenciales. Este enfoque, también permite explicar la variación composicional presente en el área de estudio, a través de lotes de magma individuales, resultado de distintos grados de fusión parcial de la fuente, que se movilizan con diversas velocidades y se diferencian durante su ascenso.

Por otro lado, Cuatempel y Cerro del Agua presentan correlaciones negativas del MgO, CaO y FeO, con respecto al SiO₂. Este comportamiento puede explicarse con el fraccionamiento incipiente de Ol+Cpx+Pg, sin embargo, en los diagramas de REE, no se observa anomalía negativa de Eu, lo que indica la ausencia de un fraccionamiento importante de plagioclasa. Además, se ha mencionado que Cuatempel y Cerro del Agua tienen afinidad con magmas primitivos por lo que no pudieron haber sufrido un proceso de cristalización fraccionada importante durante su ascenso. Por su parte, Dos Cerros presenta correlaciones negativas claras para CaO y FeO, y solo ligeramente en MgO y TiO₂. Al parecer, el fraccionamiento de los magmas del Dos Cerros fue incipiente y las fases dominantes fueron Cpx y óxidos de Ti. Posiblemente, este proceso se dio durante su ascenso y no está relacionado con una permanencia considerable en una cámara magmática somera en la corteza por la ausencia de composiciones y fases minerales más evolucionadas (Schaaf et al., 2005).

En los diagramas de REE de los volcanes analizados en este estudio, el contenido de tierras raras ligeras está enriquecido con respecto a las pesadas, así como en los elementos litófilos de alto radio iónico (LILE: Cs, Ba, K) respecto a los elementos de alto potencial iónico (HFSE: Nb, Ta, Ti, Y; Figura 33). El empobrecimiento de las tierras raras pesadas se puede explicar mediante la fusión parcial de una fuente que estaba enriquecida en fases que retenían a estos elementos (Dorendorf et al., 2000). Dos Cerros presenta una concentración en tierras raras ligeras mayor a Cerro del Agua y Cuatempel, lo cual podría deberse a una fuente distinta en composición (Agustin-Flores et al. 2011). Cabe mencionar que, para el caso del Pelado Lorenzo-Merino (2016) sugiere que al menos dos lotes de magma fueron involucrados durante el evento eruptivo (Figura 33). La dispersión que se observa en las gráficas de varios elementos en el área de estudio (por ejemplo: Figura 30, 31, 32) también refuerza la idea planteada sobre la heterogeneidad del manto ubicado por debajo del CVSC (Siebe et al., 2005).

Diversos autores proponen una migración del vulcanismo con respecto al tiempo, en una dirección N-S (Cantagrel y Robín., 1979; Nixon et al., 1987; Alaniz-Alvarez et al., 1998; Osete et al., 2000). Sin embargo, en el área estudiada, no fue posible observar ninguna tendencia espacial regional predominante, asimismo, al analizar los datos de variación composicional, no se observa ningún patrón o tendencia con respecto a la posición geográfica. Cabe mencionar que de manera local si se observa una ligera tendencia de lineamiento con dirección E-W, la cual permitiría alinear la mayor parte de las diversas estructuras (principalmente volcanes y algunos centros eruptivos), y en menor medida, se observan otros dos lineamientos de orden local con dirección NW-SE y N-S, lo cual es consistente con lo expresado por Siebe y colaboradores (2005), referente al control estructural.

4.4 CONCLUSIÓN

En el sector oriental del CVSC, al menos 18 erupciones (25% del total de volcanes) corresponden a vulcanismo reciente (Pleistoceno Superior-Holoceno). De las tres erupciones recientes estudiadas con detalle en este trabajo, fechamos al volcán Cuatapel con 27,700 años A.P., al volcán Dos Cerros 18,500 años A.P., y a Cerro del Agua con 16,300 años A.P., también se obtuvieron edades preliminares para el volcán La Joya (39,700 A.P.), Ocusacayo (26,000 A.P.), Tapeixte (24,200 A.P.), Aholo (22,200 A.P.), Sochol (19,100 A.P.), y Ocoxusco (36,100 A.P.), además de edades relativas estratigráficas para otros 20 volcanes en la zona de estudio. Se presenta una serie de mapas temáticos de la zona en alta resolución con toda la información sintetizada, de forma accesible para su uso en campo y gabinete.

Los productos analizados exhiben características geoquímicas asociadas a magmas de arco con una composición predominantemente intermedia (andesítica basáltica a andesítica), a su vez, existen algunos productos dacíticos, los cuales se encuentran restringidos al límite occidental de área de estudio. De las tres erupciones estudiadas con mayor detalle, el volcán que presenta los productos menos diferenciados es Cerro del Agua, seguidamente se encuentra Cuatapel y por último se tiene a Dos Cerros, el cual presenta los productos más diferenciados en función de la composición química de elementos mayores y traza.

Los tres volcanes estudiados muestran evidencia de que han sufrido cierto grado de cristalización fraccionada en su ascenso a la superficie, denotado por las anomalías negativas de Ti y P. La presencia de inclusiones de óxidos (posiblemente cromitas) dentro de los cristales de olivino y piroxeno, podría sugerir que su formación ocurrió previamente a la cristalización del olivino, muy posiblemente estos cristales fungieron como semillas o núcleos en la formación de los minerales ferromagnesianos. Las variaciones importantes en elementos traza de los productos de estos tres volcanes evidencian heterogeneidades en la fuente ubicada debajo del campo volcánico.

Se amplió el catálogo de datos geoquímicos y fechamientos, de tal forma que representan una base robusta para futuros estudios dentro del sector oriental del CVSC, a su vez, se establecieron edades mínimas relativas de diversas estructuras, las cuales quedan reportadas como un primer acercamiento para su estudio. Es necesario seguir ampliando el catálogo de datos dentro del área, ya que permitirá refinar los estudios existentes, además de fungir como una plataforma sólida para las subsecuentes investigaciones.

Identificamos que las tefras de Dos Cerros, Cerro del Agua y Cuatempel presentan características distintas en cuanto a tamaño de grano, vesicularidad y contenido de cristales dentro de la secuencia. También presentan ensambles mineralógicos distintos y cubren rangos composicionales diferentes en ciertos elementos traza como Sr, La, Nb, Ba, Th, Zr, y en elementos menores como K_2O y P_2O_5 .

La composición total de las tefras alojadas por las erupciones de Cerro del Agua, Dos Cerros y Cuatempel grafican en campos diferentes y bien delimitados en varios diagramas geoquímicos propuestos, por lo tanto, estos pueden emplearse para corroborar en primera instancia el origen de las tefras encontradas en sus cercanías, de las cuales se tengan indicios (características macroscópicas y mineralógicas, relaciones estratigráficas, edad relativa) de que pueden pertenecer a alguna de las tres fuentes estudiadas. Además, se presenta un campo preliminar definido para el volcán La Joya. A su vez, se estableció la secuencia de eventos eruptivos hasta 40,000 años A.P., en donde no se observó ninguna periodicidad o patrón recurrente en la actividad eruptiva, lo cual permite concluir que al menos para este intervalo de tiempo, el CVSC presenta un comportamiento imprevisible. Finalmente, fue posible determinar que el volumen de productos emitidos durante la

Capítulo IV

erupción de Dos Cerros se encontraba previamente subestimado, se actualizó el correspondiente para Cerro del Agua y se presentó por primera vez datos para Cuatepel.

Estos resultados son importantes por cuestiones de evaluación del riesgo en el centro de México, identificación del origen de capas de tefra en la cuenca de México, y estudios sobre el origen y evolución de los magmas en el CVSC.

REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., 1998, Effects of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt: *Geology*, 26(7), 591-594.
- Agustín-Flores, J., 2009, Geología y petrogénesis de los volcanes monogenéticos Pelagatos, Cerro del Agua y Dos Cerros en la Sierra Chichinautzin, al sur de la Ciudad de México. Ms thesis, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 117 pp.
- Agustin-Flores, J., Siebe, C., Guilbaud, M.N., 2011, Geology and geochemistry of Pelagatos, Cerro del Agua, and Dos Cerros monogenetic volcanoes in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field, south of México City, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 201, Issues 1–4, Pages 143-162, ISSN 0377-0273.
- Arana-Salinas, L., 2004, Geología de los volcanes monogenéticos Teuhtli, Tláloc, Tlacotenco, Ocusacayo y Cuauhtzin en la Sierra Chichinautzin, al Sur de la Ciudad de México. Ms thesis, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 117 pp.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F.W., 1998, Paleogene extension in the southern basin and range province of Mexico: syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato mining district. *Int. Geol. Rev.* 40:116–134. <https://doi.org/10.1080/00206819809465201>.
- Arce, J.L., Layer, P.W., Lassiter, J.C., Benowitz, J.A., Macías, J.L., Ramirez-Ezpinoza, J., 2013, ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, geochemistry, and isotopic analyses of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption rate, and distribution of volcanism, *Bull Volcanology* (2013) 75:774, DOI 10.1007/s00445-013-0774-6.
- Atwater, T., 1970, Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America: *Geological Society of America Bulletin*, 81, 3513-3536.
- Atwater, T., 1989, Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America, en Winterer, E., Hussong, D., Decker, R. (eds.), *The northeastern Pacific Ocean and Hawaii*: Boulder, CO, Geological Society of America, *The geology of North America*, N, 21-72.
- Bannister, V., Roeder, P., Poustovetov, A., 1998, Chromite in the Paricutin lava flows 1943–1952. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 87, 151–171.
- Bloomfield, K., 1975, A late Quaternary monogenetic volcano field in central México. *Geol. Rundsch.* 64, 476–496.
- Bronk Ramsey, C., 2009, Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337-360.
- Campa, M. F., Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.

Capítulo IV

- Carmichael, I., 2002, The andesite aqueduct: perspectives on the evolution of intermediate magmatism in west-central (105°-99°W) Mexico: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143, 641-663.
- García-Palomo, A, Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V.H., Espíndola, J.M., 2002, Geology of Nevado de Toluca volcano and surrounding areas, Central Mexico. *Geol. Soc. Am. Map Chart Ser. MCH089*, pp. 1–26.
- Delgado-Granados, H. y Martín del Pozzo, A. L., 1993, Pliocene to Holocene volcanic geology at the junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco ranges, southwest of México City. *Geof. Int.*, 32, 511-522.
- Gonzalez, S., Pastrana, A., Siebe, C., Duller, G., 2000, Timing of the Prehistoric eruption of Xitle volcano and the abandonment of Cuicuilco pyramid, southern Valley of Mexico. In: McGuire, B., Griffiths, D., Stewarts, I. (Eds.), *The Archaeology of Geological Catastrophes*. Geological Society of London Special Publication 171, 205-224.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Instituto de Geología*, 2, 172-187.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., Stein, S., 1994, Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions: *Geophysical Research Letters*, 21, 2191-2194.
- Dougherty, S.L., Clayton, R.W., Helmberger, D.V., 2012, Seismic structure in central Mexico: Implications for fragmentation of the subducted Cocos plate: *Journal of Geophysical Research*, 117, B09316.
- Dougherty, S.L., Clayton, R.W., 2014, Seismicity and structure in central Mexico: Evidence for a possible slab tear in the South Cocos plate: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 3424-3447.
- Engelbreton, A., Cox, A., Gordon, R., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 206, 64 p.
- 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*, 27, 303-306.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012, The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.
- Frey, F.A., Green, D.H. and Roy, S.D., 1978, Integrated Models of Basalt Petrogenesis - Study of Quartz Tholeiites to Olivine Melilities from South Eastern Australia Utilizing Geochemical and Experimental Petrological Data. *Journal of Petrology* 19(3): 463-513.
- Fries, C., 1960, Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México, *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, 60, 236 p.
- Fries, C., 1962, Bosquejo geológico de las partes central y occidental del Estado de Morelos y áreas contiguas de Guerrero y México. 20th Intern. Geol. Congr. 1956, México, Field Trip Guide No. C-9. UNAM, México, pp. 17-53.

- García-Palomo, A., Macías, J., Garduño, V., 2000, Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico: *Tectonophysics*, 318, 281-302.
- García-Palomo, A., Macías, J., Tolson, G., Valdez, R., Mora-Chaparro, J., 2002, Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Transmexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, 41, 133-150.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2007, Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt, in Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F. (eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422*, 129–181.
- Guilbaud, M.N., Siebe, C., Agustín-Flores, J., 2009a, Eruptive style of the Young high-Mg basaltic andesite Pelagatos scoria cone, southeast of Mexico City: *Bulletin of Volcanology*, 71, 859-880.
- Guilbaud, M.-N., Arana-Salinas, L., Siebe, C., Barba-Pingarrón, L.A., Ortiz, A., 2015, Volcanic stratigraphy of a high-altitude *Mammuthus columbi* (Tlacotenco, Sierra Chichinautzin), Central México, *Bull Volcanol* (2015) 77:17, DOI 10.1007/s00445-015-0903-5.
- Hasenaka, T., y Carmichael, I.S.E., 1985, The cinder cones of Michoacán–Guanajuato, central México: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 25, 105–124.
- Hasenaka T, Carmichael, I.S.E., 1987. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: petrology and chemistry. *J Petrol* 28:241–269.
- Hasenaka, T., 1994, Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 63, Issues 1–2, October 1994, Pages 13-31, ISSN 0377-0273, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7). Siebe, C., Arana-Salinas, L., Abrams, M., 2005. Geology and radiocarbon ages of Tláloc, Tlacotenco, Cuauhtli, Hijo del Cuauhtli and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of Sierra Chichinautzin. *México. J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 141, 225-243.
- Herrero, E., Pal, S., 1978. Paleomagnetic study of Sierra de Chichinautzin. *Geofis. Int.* 17, 167–180. Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971, A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971, A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Jaimes-Viera, M.C., Martin Del Pozzo, A.L., Layer, P.W., Benowitz, J.A., Nieto-Torres, A., 2018, Timing the evolution of a monogenetic volcanic field: Sierra Chichinautzin, Central México. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.013>.
- Kostoglodov, V., Bandy, W., 1995, Seismotectonic constraints on the convergence rates between the Rivera and North American plates: *Journal of Geophysical Research*, 100(B9), 17977-17989.

Capítulo IV

- Le Corvec, N., Spörl, K.B., Rowland, J., Lindsay, J., 2013, Spatial distribution and alignments of volcanic centers: Clues to the formation of monogenetic volcanic fields: *Earth-Science Reviews*, 124, 96-114.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lonsdale, P., 1991, Structural patterns of the Pacific floor offshore peninsular California, en Dauphin, J., Simoneit, B. (eds.), *The gulf and the peninsular province of the Californias*: Tulsa, OK, American Association of Petroleum Geologists, *Memoir*, 47, 87-125.
- Lorenzo-Merino, A., 2016, Historia eruptiva del Volcan Pelado (Sierra Chichinautzin, Mexico). Ms thesis, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 110 pp.
- Lorenzo-Merino, L., Guilbaud, M.N., Roberge, J., 2018. The violent-Strombolian eruption of 10 ka Pelado shield volcano, Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Bull. Volcanol.* 80, 27.
- Luhr, J.F., Simkin, T., 1993, Parícutin. In: *The Volcano Born in a Mexican Cornfield*. Geoscience Press, Phoenix (427 pp).
- Luhr, J. F., 1997, Extensional tectonics and the diverse primitive volcanic rocks in the western Mexican Volcanic Belt: *Canadian Mineralogist*, 35, 473-500.
- Márquez, A., Oyarzun, R., Doblas, M., Verma, S.P., 1999a, Alkalic (ocean-island basalt type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican volcanic belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin?: *Geology*, 27, 51-54.
- Márquez, A., Verma, S.P., Anguita, F., Oyarzún, R., Brandle, J.L., 1999b, Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extension at the front of the Central Trans-Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 93, 125–150.
- Martin del Pozzo, A.L., 1982, Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin. México. *Bull. Volcanol.* 45, 9–24.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology* 5(1): 82-133.
- MacDonald, G.A., 1972, *Volcanoes*: Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice-Hall, 510 pp.
- McDonough, W. F., Sun, S. S., Ringwood, A. E., Jagoutz, E., & Hofmann, A. W., 1992, Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3), 1001-1012.
- Mooser, F., 1967. Tefracronología de la Cuenca de México para los últimos 30,000 años. *Boletín del INAH* 30, 12–15.
- Mooser, F.M., Nairn, A.E.M., Negendank, J.F.W., 1974, Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII A paleomagnetic and petrologic study of the volcanics of the Valley of México. *Geol. Rundsch.* 63, 451–483.

- Mora-Álvarez, G., Caballero-Miranda, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Uchiumi, S., 1991, Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of Mexico? -a preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study: *Geofísica Internacional*, 30, 61-70.
- Murphy, G.P., 1982. The chronology, pyroclastic stratigraphy, and petrology of the Valle de Santiago Maar Field, Central Mexico: Berkeley, EE. UU., Universidad de California, tesis de maestría, 55 p.
- Németh, K., Kereszturi, G., 2015, Monogenetic volcanism: personal views and discussion. *Int. J. Earth Sci.* 104:2131–2146. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1243-6>.
- Nixon, G., 1982, The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere: *Geological Society of America Bulletin*, 93, 514-523.
- Ochoterena, H., 1978, Origen y edad del Tepozteco. *Bol. Inst. Geog., UNAM, México*, 8, 41-54.
- Ortega-Gutiérrez, F., Sedlock, R. L., Speed, R. C., 1994, Phanerozoic tectonic evolution of Mexico, en Speed, R. C. (ed.), *Phanerozoic evolution of North American continent-ocean transitions: Boulder, CO, Geological Society of America, DNAG Continent-Ocean Transect Series*, 265-306.
- Ortega-Guerrero, B., Lozano-García, M., Caballero, M., Herrera-Hernández, D.A., 2015. Historia de la evolución deposicional del lago de Chalco, México, desde el MIS 3. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 67 (2), 185e201.
- Ortega-Guerrero, B., Caballero-García, L., Linares-López, C., 2018, Tephrostratigraphy of the late Quaternary record from Lake Chalco, central México: *Journal of South American Earth Sciences*, 81, 122-140
- Osete, M., Ruiz-Martínez, V., Cabellero, C., Galindo, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Tarling, D., 2000, Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de las Cruces, Mexico: paleomagnetic and radiometric evidence: *Tectonophysics*, 318, 201-215.
- Pardo, M., Suárez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco Block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, 20, 2391-2394.
- Pardo, M., Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico: Seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.
- Parfitt, E. A., Wilson, L., 2008. *Fundamentals of physical volcanology*. Blackwell Science Ltd, Oxford, 230 pp.
- Pasquaré, G., Garduño, V., Tibaldi, A., Ferrari, M., 1988, Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 146, 353-364.
- Pérez-Campos, X., Kim, Y., Husker, A., Davias, P.M., Clayton, R.W., Iglesias, A., Pacheco, J.F., Singh, S.K., Manea, V.C., Gurnis, M., 2008, Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico: *Geophysical Research Letters*, 35, L18303.
- Perfit, M.R., Davidson, J.P., 2000, Plate tectonics and volcanism, in Sigurdsson, H. (ed.), *Encyclopaedia of Volcanoes: San Diego, CA, Academic Press*, 89-113.
- Reimer, P., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J., Blackwell, P., Ramsey, C., Van der Plicht, J., 2013, IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869-1887. doi:10.2458/azu_js_rc.55.16947.

- Roberge, J., Guilbaud, M.-N., Mercer, C.M., Reyes-Luna, P.C., 2015, Insight into monogenetic eruption processes at Pelagatos volcano, Sierra Chichinautzin, Mexico: a combined melt inclusion and physical volcanology study, in Zellmer, G.F., Edmonds, M., Straub, S.M. (eds.), *The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas*: London, Geological Society, Special Publication 410.
- Schaaf, P., Stimac, J., Siebe, C., Macías, J.L., 2005. Geochemical evidence for mantle origin and crustal processes in volcanic rocks from Popocatepetl and surrounding monogenetic volcanoes, central Mexico. *Journal of Petrology* 46, 1243–1282.
- Sedlock, R., Ortega-Gutiérrez, F., Speed, R., 1993, Tectonostratigraphic terranes and the tectonic evolution of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 278, 153 p.
- Siebe, C., 2000, Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104, 45-64.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., 2004a, Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of México City: implications for archaeology and future hazards. *Bull. Volcanol.* 66, 203–225.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., 2004b, Geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichi-nautzin scoria cones, south of México City. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 130, 197–226.
- Siebe C., Arana-Salinas, L., Abrams, M., 2005, Geology and radiocarbon ages of Tlaloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Chichinautzin, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 225-243.
- Smith, I.E., Németh, K., 2017, Source to surface model of monogenetic volcanism: a critical review. In: Németh, K., Carrasco-Nuñez, G., Aranda-Gómez, J.J., Smith, I.E.M. (Eds.), *Monogenetic Volcanism*. vol. 446. *Geol. Soc. Lon. Spec. Publ.*, pp. 1–28.
- Straub, S. M., A. B. LaGatta, A. L. Martin-Del Pozzo, and C. H. Langmuir (2008), Evidence from high-Ni olivines for a hybridized peridotite/pyroxenite source for orogenic andesites from the central Mexican Volcanic Belt, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q03007, doi:10.1029/2007GC001583.
- Sosa-Ceballos, G., Gardner, J.E., Siebe, C., Macías, J.L., 2012, A caldera forming eruption ~14100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214, 27-40.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Martin del Pozzo, A.L., 1991, Implicaciones de los datos paleomagnéticos sobre la edad de la Sierra de Chichinautzin, Cuenca de México. *Geofis. Int.* 33, 523–533.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Flores-Ruiz, J., 1996, Bouger gravity anomalies and regional crustal structure in central Mexico: *International Geology Review*, 38, 176-194.
- Valentine, G. A., & Gregg, T. K. P. (2008). Continental basaltic volcanoes—processes and problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4), 857-873.

- Valentine, G.A., Connor, C.B., 2015, Basaltic volcanic fields. In: The Encyclopedia of Volcanoes, Second edition. pp. 423–439.
- Verma, S., 2000a, Geochemistry of the subducting Cocos plate and the origin of subduction-unrelated mafic volcanism at the front of the central Mexican Volcanic Belt, en Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, (334), 1-28.
- Wallace, P., y Carmichael, I.S.E., 1999, Quaternary Volcanism Near the Valley of México: Implications for Subduction Zone Magmatism and the Effects of Crustal Thickness Variations on Primitive Magma Compositions. *Contrib. Mineral. Petrol.* 135, 35–60.
- Whitford-Stark, J.L., 1975, Shield volcanoes, in: Fielder, G., Wilson, L. (eds.), *Volcanoes of the Earth, Moon, and Mars*. New York, St. Martins Press, pp. 66-74.
- Wilcox, R.E., 1954, Petrology of Parícutin Volcano Mexico. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 965C, 81–353.
- Williams, H., McBirney, A.R., 1979, *Volcanology*: San Francisco, Freeman and Cooper, 397 pp.

	Dos Cerros											Dos Cerros (Guilbaud et al., 2015)						Dos Cerros (Agustín-Flores et al., 2011)										
	8B	23B	23C	23D	23E	33D	38A	51C	62E	44	45	46	60	17A	18A	19A	PG506	PG503	PG504	PG508	PG509	PG528	PG525	PG526	PG536	PG527	PG507	
	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Lava	Lava	Lava	Lava	Cen	Cen	Cen	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Bomba
SiO2	58.4	57.65	57.69	57.74	57.13	56.77	55.82	54	56.87	57.2	58.3	58.8	59.4	56.38	56.11	56.76	55.09	55.99	56.34	56.48	56.76	57.97	58.55	58.68	58.87	59.57	57.48	
Al2O3	16.18	16.19	15.92	16.04	15.84	16.48	16.83	16.62	16.8	14.9	15.4	15.3	15.4	15.21	14.93	15.36	15.52	16.91	16.21	16.02	16.03	15.05	15.56	15.45	15.63	15.46	16.19	
Fe2O3(T)	7	6.86	7.29	7.37	7.1	7.28	7.74	7.96	7.05	6.55	7.01	6.68	6.98	7.35	7.7	6.86	7.73	7.49	7.38	7.19	7.27	7.22	6.96	6.54	6.42	6.74	7.02	
MnO	0.112	0.112	0.117	0.12	0.115	0.118	0.121	0.13	0.115	0.14	0.11	0.11	0.12	0.1	0.1	0.1	0.125	0.119	0.121	0.118	0.12	0.116	0.113	0.103	0.112	0.107	0.117	
MgO	3.93	3.96	5.04	5.11	4.5	4.18	4.26	4.09	4.16	4.19	4.31	4.14	4.06	5.16	6.20	4.72	6.45	4.41	5.02	5.05	5.03	5.34	4.53	4.94	4.37	4.25	4.83	
CaO	5.91	6.22	6.3	6.23	6.12	6.11	5.99	6.12	6.03	6.92	6.3	6.32	6.1	6.3	6.0	6.3	7.32	7.06	6.83	6.78	6.8	6.69	6.34	6.12	6.07	6.05	6.45	
Na2O	3.58	3.64	3.67	3.61	3.64	3.72	3.52	3.31	3.58	3.76	3.83	3.93	3.99	3.26	3.48	3.63	3.7	3.92	3.91	3.75	3.73	3.53	3.63	3.69	3.83	3.75	4.04	
K2O	1.74	1.65	1.66	1.61	1.62	1.52	1.39	1.28	1.58	1.77	1.88	1.84	1.92	1.66	1.49	1.51	1.89	1.96	1.91	1.88	1.96	2.04	1.89	1.71	1.45	1.94	1.88	
TiO2	1.126	1.119	1.14	1.164	1.149	1.287	1.353	1.501	1.252	1.01	1.07	1.05	1.07	1.12	1.13	1.07	1.136	1.217	1.158	1.131	1.14	1.092	1.084	1.048	1.113	1.046	1.153	
P2O5	0.4	0.42	0.41	0.41	0.39	0.45	0.41	0.41	0.39	0.34	0.35	0.36	0.38	0.37	0.34	0.31	0.4	0.4	0.4	0.38	0.39	0.44	0.38	0.3	0.42	0.36	0.37	
LOI	1.49	0.93	0.35	0.6	0.88	1.24	2.05	3.51	1.76	2.22	0.69	0.87	0.03	1.43	1.39	2.04	0.38	0.34	0.5	0.27	0.55	0.42	0.58	0.6	0.74	0.61	< 0.01	
Total	99.86	98.75	99.6	100	98.49	99.15	99.47	98.93	99.6	99	99.3	99.4	99.4	98.40	98.92	98.62	99.74	99.81	99.78	99.04	99.78	99.92	99.59	99.18	99.01	99.88	99.26	
Au	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	8	< 1	9	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1															
Ag	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	< 0.5	0.6	< 0.5	0.6	0.7	0.5				1	0.9	1.2	0.7	1.2	0.8	0.9	0.8	0.6	0.8	0.9	
As	1	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1	2	< 1	2	2	2	2															
Ba	583	572	558	555	559	540	536	501	559	560	582	580	633	642	512	497	659	581	590	585	586	771	573	571	610	571	598	
Be	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2															
Bi	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1	< 0.1	0.1	0.1	0.1	0.1															
Br	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5				< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	2	1.2	2	< 0.5
Cd	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5				0.6	0.8	0.9	0.6	0.9	1.6	0.5	1.7	< 0.5	1.7	0.6	
Co	21.4	20.8	20.8	22.3	22.9	23.4	21.9	23	19.1	17.7	18.2	19	18.9	25.1	25.3	22.3	20.4	23.3	22.4	26	21.5	24.5	20.7	22.8	21.7	22.8	26.1	
Cr	137	126	189	176	166	117	122	143	139	141	161	181	148	227.0	289.0	189.0	147	187	101	231	149	219	150	168	158	168	248	
Cs	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1	1.1	1.4	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.7	1.6	1.4	1.8	1.8	1	1.4	1.5	1.4	1.5	1.3	
Cu	18	20	20	29	19	19	18	23	19	24	23	31	29	21.0	19.0	20.0	24	14	20	20	20	23	18	18	20	18	18	
Ga	20	20	19	20	20	20	20	20	20	19	19	19	19	21	18	19												
Ge	1.5	1.3	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	2	1.3	1	2	1	2	1.5	1.4	1.6												
Hf	6.4	5.8	5.5	5.9	5.6	6.3	6	5.8	6.5	5.7	6	5.9	5.9	6.30	5.30	4.60	5.8	7	7.1	7.8	6.2	6.8	6.4	7	6.2	7	5.7	
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1															
In	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.1															
Ir	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1															
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3	< 2	3	3	4	3															
Nb	13.3	13.3	12.2	12.7	11.9	14.2	14.5	16	14.3	12	13	13	13	15.7	13.7	11.7	22	24	21	21	21	23	20	18	16.6	20	21	
Ni	49	52	73	78	71	56	63	53	60	53	51	53	55	82	105	73	110	29	53	53	55	76	53	58	54	58	59	
Pb	5	6	7	< 5	< 5	< 5	< 5	7	< 5	5	6	8	6				6	10	8	13	13	31	22	24	8	24	6	
Rb	43	40	39	39	40	33	32	31	36	40	42	42	44	45	36	38	50	80	80	70	50	50	30	50	50	50	40	

S	0.004	0.007	0.008	0.007	0.005	0.005	0.004	0.017	0.004	0.03	0.01	0.01	0.01														
Sb	< 0.1	0.5	< 0.1	0.4	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	0.1	1.8	0.7	0.2				0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2
Sc	16.8	16.6	16.9	16.9	16.8	17.7	17.9	20.2	16	15.9	16.7	16.2	15.9	18.50	15.80	15.40	16.8	19.4	21.4	21	18.3	18.1	16.9	17.3	15.7	17.3	18.4
Se	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5				168	19.4	21.4	021	18S	18.1	16.9	172	15.7	17.3	18.4
Sn	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	2	2	2														
Sr	441	466	470	476	477	478	486	494	470	434	436	448	451	462	428	478	506	452	448	442	445	536	435	430	492	430	446
Ta	0.97	0.9	0.94	0.91	0.93	1.03	1.07	1.1	0.94	0.8	0.9	0.8	1	0.99	0.89	0.81	< 0.3	< 0.3	< 0.3	0.8	1.3	1.4	< 0.3	1.3	0.9	1.3	0.9
Th	5.26	4.85	4.81	4.71	4.82	4.07	4.25	3.67	4.27	4.61	4.69	4.72	5	6.02	4.45	4.26	4.1	5.2	5.5	5	4.8	6	5	5	5.66	5	4.8
U	1.46	1.42	1.47	1.38	1.43	1.19	1.21	1	1.21	1.3	1.3	1.3	1.4	1.53	1.36	1.36	1.7	1.8	2	2	1.9	1.7	1.4	1.3	1.64	1.7	1.4
V	115	116	118	117	113	111	111	110	114	112	120	115	116	126.0	123.0	130.0	122	130	120	121	121	125	123	113	119	113	110
W	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1														
Y	27	26	26	27	26	26	27	25	23	22	23	23	23	24	22	21	28	28	28	28	28	29	27	26	27	26	27
Zn	78	75	77	77	76	77	73	86	78	97	84	82	85	89.0	80.0	74.0	89	82	81	84	85	90	88	91	79	91	86
Zr	306	286	275	281	279	299	293	309	278	286	303	300	304	309	254	225	268	292	297	289	294	275	276	278	297	278	293
La	33.1	30.4	30.4	29.9	30.5	29.5	29.6	29	28.6	28.6	29.4	29.7	31.2	40.3	29.3	27	30.8	36.2	37.8	39.3	34.3	43.3	35.1	36.2	36.1	36.2	34.3
Ce	69.2	63.3	63.2	63.1	63.7	63.2	64.9	64.5	60.6	60.5	62.1	61.7	66.4	82.9	58.4	54.7	58	73	72	77	66	61	62	46	75	46	67
Pr	8.07	7.37	7.32	7.38	7.6	7.52	7.56	7.75	7.47	7.14	7.33	7.36	7.72	10.1	7.21	6.57											
Nd	33.1	30.2	30.9	30.4	30.5	30.6	31.1	31.9	29.7	29.6	30.7	29.9	31.5	38.8	29	26.1	28	30	35	34	27	35	31	25	29.9	25	29
Sm	6.33	6.15	6.27	6.31	6.51	6.59	6.54	7.1	5.95	6.1	6.5	6.1	6.3	7.5	5.7	5.3	5.89	6.78	7.01	7.59	6.23	8.15	6.16	6.68	6.35	6.68	6.87
Eu	1.74	1.68	1.78	1.71	1.84	1.81	1.88	2.06	1.65	1.54	1.81	1.8	1.78	1.9	1.5	1.5	1.81	2.3	2.45	2.57	2.03	2.35	1.89	2.13	1.72	2.13	2.3
Gd	5.88	5.73	5.7	5.54	5.92	5.9	6.24	6.4	5.46	5.7	5.4	5.6	6	6.3	5.0	4.5											
Tb	0.86	0.81	0.82	0.8	0.84	0.86	0.91	1	0.77	0.8	0.8	0.8	0.9	0.97	0.77	0.70	0.9	1	1	1.2	1	1.1	0.8	1	0.89	1	1.1
Dy	5	4.56	4.54	4.59	4.71	4.84	5.11	5.5	4.99	4.5	4.7	4.5	4.8	5.53	4.41	3.92											
Ho	0.95	0.93	0.92	0.88	0.9	0.93	0.97	1	0.94	0.9	0.9	0.9	0.9	1.01	0.84	0.76											
Er	2.59	2.56	2.56	2.48	2.53	2.63	2.61	2.8	2.71	2.4	2.6	2.5	2.6	2.80	2.38	2.12											
Tl	0.07	0.08	0.08	< 0.05	0.06	< 0.05	0.06	0.4	0.21	0.2	0.3	0.3	0.3	0.41	0.22	0.28											
Tm	0.367	0.367	0.362	0.352	0.368	0.373	0.381	0.4	0.385	0.37	0.37	0.37	0.39	0.40	0.34	0.32											
Yb	2.38	2.37	2.34	2.32	2.45	2.44	2.58	2.6	2.44	2.5	2.3	2.4	2.4	2.63	2.26	2.08	2.5	2.54	2.62	3.23	2.9	2.99	2.7	2.92	2.2	2.92	2.55
Lu	0.387	0.36	0.381	0.382	0.381	0.384	0.396	0.4	0.375	0.37	0.35	0.36	0.36	0.41	0.35	0.33	0.32	0.34	0.38	0.39	0.34	0.44	0.42	0.45	0.332	0.45	0.3

	Cuatepel																	Cuatepel (Straub et al., 2008)		La Joya			La Joya (Schaaf et al., 2005)			
	24A	28A	29B	29C	29D	29E	30A	32B	35B	33B	55B	58B	70B	71B	74B	92D	52	75	SPO56	SPO60	94A	97A	96B	96336A	96338	96340
	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Lava	Lava	S.I.	S.I.	Cen	Cen	Cen	Escoria	Lava	Escoria
SiO2	54.98	55.28	54.86	54.71	55.87	59.15	58.19	54.85	50.71	53.88	55.06	51.96	47.62	53.31	53.51	54.06	55.6	56.54	55.6	58.9	55.74	55.91	53.9	57.73	57.71	57.64
Al2O3	16.02	16.17	15.24	15.97	14.93	15.66	15.65	15.62	15.73	15.08	15.91	15.02	18.49	17.28	16.23	16.14	16.05	15.77	16.2	16.4	13.84	14.19	16.65	15.82	15.79	15.71
Fe2O3(T)	7.46	7.51	7.69	7.69	7.67	6.74	6.92	7.43	8.66	8.03	8.14	8	8.39	7.24	7.77	7.83	7.2	7.52	7.05	6.25	7.83	8.15	8.08	6.91	7.38	7.67
MnO	0.116	0.118	0.12	0.119	0.119	0.109	0.109	0.116	0.136	0.125	0.124	0.122	0.141	0.119	0.12	0.124	0.115	0.119	0.11	0.10	0.121	0.129	0.122	0.11	0.11	0.12
MgO	7.54	6.95	8.67	8.08	8.19	6.02	6.2	8.01	10.98	9.82	6.85	8.99	7.13	5.78	7.75	7.7	6.6	5.09	7.04	5.40	8.14	8.99	5.62	6.45	6.3	6.58
CaO	6.86	6.93	6.71	6.36	6.38	5.75	5.84	6.86	6.13	6.5	6.91	7.47	6.6	6.61	6.89	7.1	6.78	6.43	7.11	5.99	6.28	6.16	6.31	6.56	6.5	6.75
Na2O	3.43	3.32	3.34	3.28	3.41	3.73	3.67	3.41	2.59	3	3.47	3.19	2.41	3.19	3.23	3.37	3.73	3.89	3.66	3.93	3.38	3.37	3.25	3.74	3.69	3.79
K2O	1.09	1.08	1.08	1.03	1.11	1.36	1.35	1.1	0.67	0.98	1.09	0.97	0.37	0.93	0.95	0.98	1.28	1.47	1.27	1.43	1.57	1.29	1.31	1.5	1.51	1.47
TiO2	0.91	0.929	0.872	0.931	0.911	0.874	0.859	0.946	0.937	0.869	1.113	0.871	1.059	0.994	0.961	0.989	0.954	1.305	0.94	0.88	1.136	1.107	1.396	1.18	1.18	1.2
P2O5	0.2	0.19	0.19	0.19	0.22	0.23	0.21	0.21	0.15	0.19	0.2	0.17	0.18	0.19	0.16	0.16	0.19	0.28	0.20	0.22	0.36	0.27	0.39	0.28	0.3	0.32
LOI	0.62	0.89	0.19	0.94	0.12	0.3	0.9	0.28	2.51	0.79	1.08	2.41	7	3.32	1.51	1.3	0.43	0.33			0.68	0.34	3.1	0.48	0.43	<0.01
Total	99.23	99.36	98.96	99.31	98.94	99.92	99.9	98.83	99.19	99.26	99.94	99.19	99.4	98.97	99.07	99.76	98.93	98.75	99.2	99.5	99.08	99.9	100.1	100.77	100.89	100.83
Au	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	4			
Ag	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5			0.5	< 0.5	0.6			
As	4	4	< 1	2	< 1	2	< 1	3	< 1	3	< 1	3	1	2	1	2	2	3			1	1	1			
Ba	292	304	276	323	296	382	367	282	340	267	322	284	212	367	316	283	324	372	311	383	541	423	515	448.3	460.1	435.6
Be	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1.3	1.4	2	1	2	1	1	2
Bi	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	< 0.1			< 0.1	< 0.1	0.1			
Br	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	2.6	1.9	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5			0.6	< 0.5	6.3			
Cd	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5	0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5			< 0.5	< 0.5	< 0.5			
Co	31.3	30.2	33.9	34.7	36	25.8	27.4	32.6	46.6	39.4	33.3	34.1	36	26.5	34.4	34.2	27.9	24.9	29.3	22.1	34.2	36	24.9	24.5	24.9	25.9
Cr	345	331	421	377	421	234	277	370	612	521	463	455	429	278	465	438	303	178	361	230	423	423	232	264	257	281
Cs	0.9	1.1	1	1.1	1	1.4	1.5	0.9	0.8	1	0.9	0.9	0.7	1.3	1.1	0.8	1	1.5	1.07	1.58	0.9	1.2	0.9	1.84	1.48	1.37
Cu	34	33	29	30	30	22	23	34	37	29	43	54	27	38	39	34	37	23			27	27	22	23	19	22
Ga	18	18	18	18	17	18	18	18	18	17	18	16	20	19	19	18	18	19			17	17	19	21	21	20
Ge	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	2	2	2	2	2	1.3	1	2			1.2	1.4	1.3			
Hf	3.2	3.3	2.9	3.5	3.4	3.8	3.6	3.3	3.3	3.1	3.4	3.1	3.7	3.4	3.5	3	3.1	4.4	3.7	4	4.9	4.2	5.5	4.74	5.07	4.91
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1			
In	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	< 0.1	0.1	0.1			< 0.1	< 0.1	< 0.1			
Ir	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1			
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3	2	< 2	2	< 2	< 2	2	2			< 2	< 2	< 2	1.74	3.02	2.87
Nb	4.7	5.4	5	5.1	5.5	4.7	4.7	4.9	5.3	4.8	8	5	6	6	5	4.7	5	9	7.7	6.4	11.4	8.4	13.7	9.84	10.13	10.18
Ni	173	139	214	218	235	153	154	197	322	250	167	223	161	109	191	189	144	79	140	109	261	219	134	131	124	130

Pb	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	5.4	6.4	< 5	< 5	< 5		10	10	
Rb	22	26	25	24	25	33	32	22	17	23	25	20	9	23	21	20	25	34	25.9	36.9	32	30	28	33.2	32.4	32.7
S	0.004	0.006	0.005	0.008	0.01	0.006	0.02	0.006	0.004	0.009	0.005	0.01	0.005	0.01	0.004	0.004	0.003	0.008			0.007	0.004	0.004			
Sb	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.5	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.5	< 0.1	0.3	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1			< 0.1	0.1	0.1			
Sc	20.1	20.7	19.6	18.5	17.9	15.6	15.9	19.5	20.5	19.7	20.2	20.6	27	21.8	21.6	21.5	19.9	18.3	22.1	18.4	17.7	17.7	18.1	19	19	19
Se	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5			< 0.5	< 0.5	< 0.5			
Sn	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	2	2	1	1	1	< 1	1	2			1	1	1			
Sr	412	409	389	413	398	418	416	415	385	377	420	389	400	427	415	428	431	431	420	434	687	482	704	528.8	504	516.3
Ta	0.36	0.41	0.38	0.4	0.4	0.39	0.41	0.36	0.39	0.37	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.33	0.4	0.7	0.46	0.42	0.72	0.56	0.87	0.59	0.6	0.6
Th	2.33	2.55	2.37	2.58	2.52	3.14	3.04	2.37	2.58	2.28	2.33	2.06	2.62	2.84	2.36	2.32	2.43	3.32	2.49	3.19	4.36	3.71	4.64	4.33	4.58	4.27
U	0.79	0.81	0.8	0.79	0.83	1.05	1	0.78	0.7	0.75	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7	0.7	0.8	1.1	0.8	1.0	1.22	1.03	1.35	1.24	1.27	1.27
V	140	139	138	125	135	117	119	138	109	128	129	124	123	118	124	142	145	134	151	129	119	123	130	129	130	130
W	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1			
Y	19	19	19	20	19	20	19	20	18	18	17	15	14	19	16	18	17	22	21.2	20.5	22	20	23	24.6	23.8	24.7
Zn	67	67	66	70	68	71	68	70	78	77	70	70	55	77	70	72	71	73			78	78	75	80	76	79
Zr	131	135	121	141	139	154	152	132	137	122	160	127	152	158	136	130	145	189	151	166	234	196	277	193.1	204.2	203.7
La	12.3	13.1	12.5	13.4	13.5	16.3	15.4	12.8	13.4	12.3	15.5	11.6	12.9	14.7	12.7	12.4	13.2	17.6	13.7	15.6	29.9	22.9	30.4	27.11	27.24	25.75
Ce	28	29.5	27.5	30.2	29.8	34.5	33.2	28.4	29.7	27	33.4	25.9	31.7	32.8	28.8	28.5	29.6	38.2	30.3	34.1	65.5	49.1	66.5	57.14	55.88	54.33
Pr	3.56	3.78	3.42	3.88	3.73	4.12	4.07	3.64	3.71	3.47	4.29	3.32	3.8	4.29	3.76	3.73	3.81	4.76	4.0	4.5	8.25	6.08	8.2	5.74	5.71	5.51
Nd	16	16.4	14.9	16.7	16.6	17.1	17.7	15.9	16.3	15.9	18.5	14.9	17.2	18.7	16.5	15.8	16.9	20.4	17.1	18.5	32.5	24.9	32.3	25.44	25.54	26.01
Sm	3.73	3.82	3.65	3.88	3.85	4.2	3.98	3.89	3.95	3.74	4.4	3.6	4.4	4.1	4.2	3.95	4	4.5	4.01	4.09	6.39	5.2	6.85	5.49	5.64	5.56
Eu	1.24	1.28	1.2	1.26	1.26	1.32	1.28	1.22	1.28	1.2	1.49	1.24	1.28	1.41	1.35	1.25	1.33	1.53	1.26	1.26	1.79	1.54	1.93	1.84	1.78	1.62
Gd	3.84	3.93	3.83	3.82	4.1	4.01	3.9	4.03	3.79	3.81	4	3.6	3.7	4.1	4	3.82	3.7	4.8	3.95	3.96	5.63	4.79	5.8	5.47	5.58	5.17
Tb	0.57	0.63	0.56	0.58	0.61	0.58	0.57	0.6	0.61	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.63	0.6	0.8	0.62	0.61	0.85	0.72	0.87	0.88	0.82	0.76
Dy	3.53	3.58	3.29	3.49	3.6	3.44	3.43	3.35	3.47	3.48	3.8	3.3	3.7	3.9	3.5	3.66	3.6	4.7	3.67	3.55	4.57	4.17	4.79	4.83	4.27	4.38
Ho	0.66	0.71	0.67	0.68	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.66	0.7	0.6	0.7	0.8	0.7	0.72	0.7	0.9	0.75	0.72	0.84	0.8	0.91	0.85	0.83	0.8
Er	1.9	2	1.94	1.91	1.9	1.95	1.97	1.92	1.86	1.87	2	1.9	2	2.2	2	1.93	2	2.6	2.09	2.00	2.35	2.27	2.58	2.58	2.38	2.28
Tl	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.06	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.3	0.1	0.4	0.3	0.1	0.14	0.2	0.2	0.18	0.18	0.16	0.17	0.21			
Tm	0.268	0.274	0.271	0.284	0.28	0.278	0.287	0.285	0.274	0.263	0.3	0.29	0.3	0.32	0.3	0.278	0.3	0.38			0.332	0.302	0.363	0.33	0.36	0.36
Yb	1.81	1.82	1.75	1.9	1.8	1.87	1.82	1.95	1.79	1.79	2	1.9	2	2	1.8	1.83	2	2.5	2.00	1.92	2.07	2.12	2.33	2.17	2.33	2.11
Lu	0.29	0.308	0.266	0.287	0.278	0.285	0.291	0.3	0.268	0.289	0.3	0.29	0.29	0.31	0.27	0.305	0.29	0.38	0.31	0.29	0.334	0.33	0.371	0.318	0.339	0.34

	Cerro del Agua			Cerro del Agua (Guilbaud et al., 2015)		Cerro del Agua (Agustín-Flores et al., 2011)								Tenango		Tapeixte		Sochol		Aholo	Aholo (Schaaf et al., 2005)	Cuajomac	Flujo Tlacotenco	Cilcuayo	Tenayo
	5C	22B	40A	5A	19C	PG511	PG512	PG520	PG521	PG522	PG523	PG524	PG530	48A	48B	91B	95B	78B	79C	57B	95017	49	59	79A	93A
	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Lava	Lava	Bomba	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Bomba	Lapilli	Cen	Cen	Cen	Cen	Cen	Escoria	Bomba	Lava	Lava	Lava
SiO2	52.14	51.34	51.69	51.74	51.66	54.08	56.45	56.09	56.06	56.27	56.62	56.77	56.66	56.08	56.28	54.02	54.25	51.1	53.6	55.17	57.44	55.02	62.43	55.56	58.53
Al2O3	16.12	17.14	16.27	16.55	17.62	16.3	15.62	16.23	16.25	15.43	15.99	15.71	14.98	15.15	14.9	17.41	16.56	17.67	16.14	16.8	16.15	13.65	15.91	14.41	15.31
Fe2O3(T)	8.68	8.8	9.5	8.77	7.98	7.92	5.86	7.59	7.52	6.94	6.92	6.97	7.12	7.55	8.42	8.33	8.32	8.7	8.4	7.36	7.08	7.27	5.72	7.07	7.05
MnO	0.132	0.133	0.144	0.1	0.1	0.12	0.108	0.115	0.114	0.108	0.106	0.105	0.109	0.123	0.133	0.129	0.133	0.14	0.133	0.116	0	0.115	0.094	0.112	0.115
MgO	7.82	6.71	8.33	8.23	6.36	7.11	7.59	6.41	6.25	7.64	6.68	7.3	8.01	5.26	5.31	4.6	3.97	7.02	6.51	6.8	6.2	7.61	3.42	7.15	5.57
CaO	7.01	7.37	7.39	7.5	6.7	6.98	7.11	6.58	6.47	6.95	6.91	6.94	7.25	7.19	7.28	5.97	5.65	6.91	7.37	6.56	6.4	7.24	5.2	8.05	6.55
Na2O	3.35	3.22	3.36	3.18	3.29	4.06	3.84	3.98	3.93	3.6	3.75	3.68	3.51	3.73	3.67	3.47	3.09	3.1	3.45	3.39	3.93	3.33	4.3	3.5	3.84
K2O	1.09	1.02	1.02	0.98	0.68	1.35	1.02	1.43	1.5	1.17	1.25	1.15	1.12	1.69	1.57	1.41	1.14	0.9	1.11	1.04	1.32	2.31	1.72	1.69	1.84
TiO2	1.341	1.488	1.425	1.42	1.27	1.361	0.938	1.313	1.318	0.873	0.984	0.891	0.821	1.114	1.107	1.444	1.614	1.508	1.434	0.973	0.96	1.139	0.787	1.104	1.24
P2O5	0.33	0.34	0.36	0.32	0.19	0.33	0.18	0.32	0.33	0.2	0.22	0.21	0.18	0.44	0.46	0.35	0.39	0.31	0.32	0.2	0.22	0.59	0.25	0.53	0.51
LOI	0.46	1.28	0.48	1.68	4.46	0.06	0.1	< 0.01	0.21	0.3	0.38	0.15	0.25	0.43	0.11	2.64	5.25	3.51	1.28	1.79	< 0.01	0.69	-0.2	0.67	0.05
Total	98.47	98.84	99.96	100.50	100.30	99.67	98.81	99.68	99.95	99.46	99.79	99.87	100	98.76	99.25	99.78	100.4	100.9	99.73	100.2	99.48	98.96	99.63	99.82	100.6
Au	< 1	< 1	< 1											< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	8	< 1	< 1	< 1	< 1	3
Ag	< 0.5	< 0.5	0.6			1.7	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5	0.6	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.6	< 0.5	0.5
As	3	7	< 1											2	4	2	< 1	< 1	1	< 1		2	< 1	< 1	< 1
Ba	314	325	268	321	325	335	314	335	362	299	325	308	283	501	506	573	567	361	386	311	333.00	989	511	829	602
Be	2	2	2											2	2	2	2	2	1	1	1.00	2	2	2	2
Bi	< 0.1	< 0.1	0.1											0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1		0.1	0.1	< 0.1	< 0.1
Br	< 0.5	< 0.5	< 0.5			1.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	2.1	< 0.5	< 0.5	1.3	< 0.5	4.9	< 0.5	1.3	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cd	< 0.5	< 0.5	< 0.5			1	0.6	1.2	2	0.9	< 0.5	2.5	0.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5		< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Co	38.7	33.9	39.5	36.2	28.4	37.9	28.5	29.7	27.5	31.4	29.1	32.5	33.8	23.4	27	23.5	21.8	31.3	31.7	28	24.2	30.4	18.5	25.9	24.2
Cr	238	227	349	273.0	295.0	514	215	218	201	362	259	368	417	184	229	159	122	250	244	346	297	387	160	304	211
Cs	0.7	0.7	0.9	0.7	1.3	1.1	1.1	1.5	1.1	0.7	< 0.2	1.4	1.1	1.3	1.3	1.4	2.1	0.7	0.7	1	1.35	1.3	1.6	1.1	1.1
Cu	28	33	40	32.0	30.0	25	33	26	22	33	40	35	34	30	27	22	24	30	29	26	29	25	44	38	34
Ga	18	18	17	19	18									19	19	19	20	19	19	19	22	18	19	20	20
Ge	1.3	1.3	1.3	1.4	1.6									2	2	1.3	1.5	1.3	1.4	1.4		1.5	2	1.5	1.4
Hf	4.2	4.1	4	4.10	3.50	3.8	5.7	4.5	4.3	3.6	3.7	3.8	3.4	5.5	5.3	5.2	6.5	4.8	4.5	3.6	3.73	5.7	4.3	5.3	6.1
Hg	< 1	< 1	< 1											< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1
In	< 0.1	< 0.1	< 0.1											0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1		0.1	0.1	< 0.1	< 0.1
Ir	< 1	< 1	< 1											< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1
Mo	< 2	< 2	< 2											2	3	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2.23	2	2	< 2	< 2
Nb	11.6	12.7	12.7	14.6	7.8	27	15	26	27	14	16	13	11	13	13	14.5	17.9	13.5	13.6	5.3	6.05	9	6	4.7	13.7
Ni	180	124	189	189	138	147	191	142	140	203	173	186	208	80	81	76	72	157	131	165	161	237	57	198	132

Pb	< 5	< 5	< 5			9	< 5	36	16	26	19	16	23	5	8	6	< 5	< 5	< 5	< 5	8	< 5	9	5	< 5
Rb	20	21	21	20	16	40	< 10	30	50	< 10	< 10	30	30	36	36	32	29	20	23	24	29.3	46	38	30	36
S	0.004	0.005	0.014											0.005	0.011	0.008	0.018	0.008	0.008	0.003		0.007	0.014	0.004	0.004
Sb	0.2	< 0.1	0.1			< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4	< 0.1	0.1	0.2	0.1	0.3		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Sc	21	23.9	23.4	21.70	17.80									18.8	18.8	18.1	18.2	20.7	21.7	18.5	18	17.6	12.8	17.4	15.6
Se	< 0.5	< 0.5	< 0.5			23.7	18.1	18.9	17.5	19.1	18.7	20.5	21.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5		< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Sn	1	1	1											2	2	1	2	1	1	1		2	2	1	1
Sr	485	499	443	469	478	598	509	599	586	479	523	490	440	440	440	504	478	485	470	417	420.7	985	421	1141	708
Ta	0.83	0.93	0.9	0.91	0.52	1.1	0.9	< 0.3	< 0.3	< 0.3	0.6	< 0.3	< 0.3	0.8	0.8	0.92	1.06	0.92	0.88	0.41	0.39	0.65	0.6	0.36	0.93
Th	2.75	2.77	2.45	3.09	2.31	1.8	2.4	3	3.1	2.5	2.6	2.5	2.4	3.68	3.8	3.85	3.61	2.63	2.83	2.43	3.17	5.8	3.76	5.01	4.67
U	0.93	0.87	0.86	0.7	0.73	0.7	0.9	1.3	1.3	0.7	1.1	1.4	0.8	1.1	1.2	1.26	1.21	0.82	0.86	0.8	1.03	1.8	1.2	1.58	1.37
V	135	142	151	149.0	116.0	136	129	136	136	133	138	133	140	125	126	111	95	135	143	132	132	130	95	145	129
W	< 1	< 1	< 1											< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1
Y	21	24	25	23	19	23	18	22	22	18	19	18	17	24	25	27	25	23	23	17	20.6	26	16	23	24
Zn	69	75	68	76.0	70.0	69	71	79	76	73	79	73	73	78	84	82	43	73	73	67	77	82	82	77	77
Zr	191	204	191	197	159	189	137	181	180	128	147	133	120	289	290	270	298	201	216	138	141.4	274	188	183	250
La	19.2	20.4	17.9	21.5	15.8	11.2	20.4	22.9	22	14.5	16.7	16.3	13.9	28.5	28.6	27.8	30.4	20.5	21.6	13.3	16.19	45.1	18.5	42.3	32.2
Ce	42.3	44.5	39.1	46.8	36.1	25	39	43	40	27	33	32	22	61.9	61.9	59.6	65.2	43.6	47.7	29.6	34.28	103	39.8	98	69.8
Pr	5.14	5.48	4.81	5.83	4.72									7.42	7.4	7.44	8.03	5.52	5.96	3.89	3.6	13.3	4.75	13.5	8.7
Nd	22.7	23.3	21.1	24.1	20.2	12	21	23	23	14	17	18	14	30	30.7	30.6	32.7	23.9	24.5	16.8	18.07	58.7	18.7	57.7	35.7
Sm	4.95	5.22	4.77	5.4	4.3	3.48	4.82	5.05	4.73	3.64	4.07	4.11	3.73	6.2	6.8	6.56	7.02	5.13	5.54	3.8	4.2	12.1	4.5	11.1	6.91
Eu	1.59	1.69	1.6	1.7	1.4	1.08	1.5	1.92	1.75	1.41	1.48	1.55	1.34	1.89	1.83	1.92	2	1.62	1.72	1.17	1.37	3.29	1.25	3.04	1.98
Gd	4.94	5.3	4.98	5.0	3.9									6	5.9	5.96	6.62	5.09	5.25	3.71	4.23	9.1	3.8	8.77	6.27
Tb	0.7	0.78	0.8	0.82	0.64	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.9	0.9	0.93	1	0.75	0.82	0.57	0.71	1.15	0.6	1.03	0.83
Dy	3.96	4.52	4.65	4.85	3.73									5.2	4.9	5.33	5.93	4.8	4.73	3.62	3.73	5.8	3.4	5.45	5.15
Ho	0.8	0.87	0.94	0.92	0.69									1	1	0.99	1.11	0.9	0.91	0.69	0.73	1	0.6	0.93	0.96
Er	2.29	2.46	2.61	2.54	1.92									2.8	2.6	2.83	3.11	2.54	2.55	2	1.83	2.55	1.9	2.51	2.76
Tl	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.14	0.23									0.3	0.3	0.27	0.38	0.17	0.12	0.16		0.1	0.3	0.16	0.15
Tm	0.325	0.348	0.388	0.37	0.29									0.38	0.4	0.398	0.431	0.362	0.357	0.29	0.3	0.36	0.28	0.327	0.382
Yb	2.07	2.24	2.53	2.33	1.96	1.73	2.1	2.52	2.26	2.13	2.2	1.99	1.94	2.6	2.4	2.59	2.84	2.4	2.3	1.83	2.24	2.25	1.7	2.09	2.4
Lu	0.33	0.351	0.395	0.36	0.30	0.26	0.3	0.36	0.36	0.31	0.31	0.31	0.31	0.43	0.36	0.401	0.439	0.352	0.359	0.287	0.281	0.34	0.26	0.303	0.383

	Metepec	Ocoxusco	FNI		FNI	FNI	FNI
	51A	37B	47B	47C	92B	50	55C
	Lava	Ceniza	Ceniza	Ceniza	Ceniza	Lava	Ceniza
SiO2	61.38	51.84	51.57	55.06	54.09	57.22	55.45
Al2O3	14.95	15.68	14.6	15.93	15.4	16.09	15.93
Fe2O3(T)	5.83	8.35	7.45	8.07	8.32	7.47	8.72
MnO	0.091	0.13	0.116	0.122	0.129	0.12	0.129
MgO	5.83	9.56	6.75	5.74	6.41	4.54	5.49
CaO	5.47	6.99	8.28	6.85	6.74	6.6	6.78
Na2O	4.05	2.71	3.17	3.43	3.63	4.15	3.53
K2O	1.47	0.8	1.27	1.31	1.1	1.62	1.53
TiO2	0.802	0.857	1.191	1.279	1.476	1.313	1.353
P2O5	0.19	0.19	0.33	0.32	0.3	0.45	0.41
LOI	-0.07	1.85	4.3	1.31	1.04	-0.01	0.65
Total	99.98	98.95	99.02	99.43	98.65	99.56	99.97
Au	7	< 1	< 1	5	< 1	< 1	< 1
Ag	< 0.5	0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.6
As	< 1	6	1	< 1	1	2	4
Ba	399	358	441	457	323	529	492
Be	1	1	2	2	2	2	2
Bi	0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.1
Br	< 0.5	< 0.5	1.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cd	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Co	23.4	40.1	31.5	26.3	31.8	21.5	25.8
Cr	301	538	345	244	249	161	248
Cs	1.9	0.9	1	1	0.9	0.9	1.2
Cu	30	45	33	34	28	27	36
Ga	18	18	17	18	18	20	19
Ge	2	1.3	2	2	1.3	2	2
Hf	3.6	3.2	4.7	4.6	4.3	5.6	5.5
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
In	0.1	< 0.1	0.1	0.1	< 0.1	0.1	0.1
Ir	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Mo	2	< 2	3	2	< 2	3	3

Nb	5	3.8	11	10	12.9	15	14
Ni	172	275	119	94	144	61	88
Pb	< 5	< 5	< 5	7	< 5	< 5	< 5
Rb	35	18	28	28	25	30	35
S	0.004	0.006	0.022	0.006	0.006	0.002	0.01
Sb	0.3	< 0.1	0.7	0.2	< 0.1	0.3	0.4
Sc	13	24.1	18.4	19.6	19	17.4	19.3
Se	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Sn	1	< 1	2	3	1	2	2
Sr	589	446	513	553	460	497	518
Ta	0.4	0.26	0.8	0.7	0.87	1	0.9
Th	3.44	2.73	3.64	3.58	2.46	3.68	4.2
U	1.2	0.87	1.1	1	0.85	1.1	1.1
V	97	129	119	127	129	119	131
W	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Y	14	19	21	21	23	24	23
Zn	60	73	74	79	73	79	79
Zr	153	127	224	226	207	293	259
La	15.7	17.1	23.8	24	18.8	26.8	27.7
Ce	34.1	37.8	51.6	54.2	41.3	57.5	60.7
Pr	4.28	4.86	6.46	6.75	5.36	6.87	7.44
Nd	18.3	20.7	26.9	27.7	22.8	29.9	32.3
Sm	4.1	4.88	5.6	6.4	5.27	6.2	7
Eu	1.25	1.4	1.62	1.75	1.73	1.81	2.03
Gd	3.3	4.28	5.2	5.2	5.29	5.8	5.9
Tb	0.5	0.61	0.8	0.8	0.83	0.9	0.9
Dy	2.9	3.28	4.3	4.5	4.98	5	5.2
Ho	0.6	0.63	0.8	0.8	0.93	0.9	0.9
Er	1.7	1.82	2.4	2.4	2.6	2.6	2.7
Tl	0.2	< 0.05	0.2	0.2	0.17	0.2	0.2
Tm	0.24	0.26	0.33	0.35	0.376	0.37	0.38
Yb	1.5	1.73	2.2	2.2	2.42	2.5	2.5
Lu	0.25	0.27	0.31	0.34	0.365	0.35	0.38