

Impactos de la actividad volcánica en época prehispánica: Estudios edáficos en los sitios arqueológicos de Cerro del Teúl y El Pitayo, Tres Mezquites en el occidente de México

García-Zeferino, T. A.^{1*}, Solleiro-Rebolledo, E.², Cabadas-Báez, H.³, Sedov, S.⁴, Sánchez-Pérez, S.⁵, Darras, V.⁶, Solar-Valverde, L.⁷, Martínez-Méndez, L.O.⁸, Jiménez-Betts, P.⁸

Abstract

Volcanic activity in ancient Mesoamerica was decisive for many populations since it influenced daily life and the way of understanding the world. Eruptive events can provoke the total or partial abandonment of the sites, changes in the social organization, and, inclusively, changes in the pedogenesis with alteration of the natural resources. The impact of volcanic activity can be detected easily. However, it can also be “hidden” among the soil and archaeological materials; consequently, its identification and analysis are essential to understanding archaeological stratigraphy. To document the above, this work presents the results obtained at two sites in western Mexico: Cerro del Teúl in Zacatecas (ca. 100-1531 d.C.) and El Pitayo in Michoacán (200- 600 d.C.). In the case of Cerro de Teúl, the construction fills were analyzed in two stratigraphic profiles: the Patio Hundido (PH21) and the Main Plaza (P2M80). In El Pitayo, construction fills and soil horizons were analyzed in two profiles located in a trench with an E-W orientation (East Trench and South Trench). The main objective was to identify the impact of volcanic activity on the archaeological stratigraphy and the transformations of volcanic materials as a consequence of natural and anthropogenic processes, using colorimetric, granulometric, and micromorphological analyses. In addition, the chemical composition (by X-ray fluorescence) and the petrography of the volcanic ash found in the sites were determined and compared with that from surrounding volcanoes. According to the results, the ash observed in Cerro Teúl originated from the Jala eruption of the Ceboruco volcano, dated 990-1020 AD. This eruption did not produce the site abandonment, as the site was rapidly re-occupied, and the ash was left between the construction fills. In the case of El Pitayo, according to archaeological evidence (the ages of the abandoned artifacts and the absence of volcanic glass on the lower floors of the construction), it is probable that the landslide was emitted during the first half of the 6th century and the site continued developing after the event. The geochemical and mineralogical composition of the volcanic materials found in the excavations has an intermediate-acid affinity, which contrasts with the monogenetic volcanism in the area; however, as the material is reworked, it is probable that the original mineralogical composition has been modified by transport and erosional processes, or diluted by the mixture with more acid sources, as evidenced by the domain of volcanic glass with heterogeneous textures and morphologies. Until now, there is a possible source of emission of the volcanic material associated with that found in the “black earth” at the site of El Pitayo, which is the El Infiernillo volcanic event, located south of Michoacán and which has a date of 1500- 1370 BC (Mahgoub *et al.*, 2017). However, the “black earth” that covered the site is after this dating, so chronologically it would not correspond to an eruption that occurred during the occupation of the site, but it allows us to associate it as a product of a landslide from Cerro El Arco, since that the geochemical characterization of the volcanic glass shows a very close affinity to this El Infiernillo event.

Key words: tephros, micromorphology, pedogenesis, volcanic activity.

Resumen

La actividad volcánica en la Mesoamérica antigua fue determinante para muchas poblaciones, ya que influyó en la vida cotidiana y en la forma de entender el mundo. Eventos eruptivos pueden provocar el abandono total o parcial de los sitios, ocasionar cambios en la organización social y también afectar la pedogénesis de los suelos con una alteración de los recursos naturales. En muchas ocasiones, el impacto de la actividad volcánica puede detectarse a simple vista. Sin embargo, también puede quedar “escondida” entre los materiales edáficos y arqueológicos, por lo que su identificación y análisis son de suma importancia para entender la estratigrafía arqueológica. Para ejemplificar lo anterior, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos en dos sitios arqueológicos del occidente de México: Cerro del Teúl en Zacatecas (ca. 100-1531 d.C.) y El Pitayo en Michoacán (200-600 d.C.). En ambos sitios, se registraron y caracterizaron perfiles dentro de las excavaciones arqueológicas. En el caso del Cerro de Teúl, se analizaron los rellenos constructivos en dos perfiles estratigráficos de los conjuntos arquitectónicos del Patio Hundido (PH21) y la Plaza Principal (P2M80). En El Pitayo, se analizaron rellenos constructivos y horizontes de suelo en dos perfiles ubicados en una trinchera con orientación E-W (Trinchera Este y Trinchera Sur). El objetivo principal fue identificar el impacto que la actividad volcánica dejó en la estratigrafía arqueológica, así como las transformaciones que sufrieron los materiales volcánicos como consecuencia de procesos naturales y antropogénicos, por medio de técnicas colorimétricas, granulométricas y micromorfológicas. Además, se determinó la composición química total (por Fluorescencia de Rayos X) y la petrografía de la ceniza volcánica encontrada en los sitios, y se comparó con la procedente de volcanes circundantes. De acuerdo con los resultados, se determinó que, en el caso del Cerro del Teúl, la erupción Jala, datada en 990-1020 d.C. produjo los materiales volcánicos encontrados. Sin embargo, esta erupción no provocó el abandono del sitio, sino que hubo una reocupación casi inmediata y la ceniza quedó entre los rellenos constructivos. En El Pitayo, de acuerdo con las evidencias arqueológicas (edades de los utensilios abandonados, dataciones de radiocarbono y la ausencia de vidrio volcánico en los pisos inferiores de la construcción), se presume que el deslave ocurrió durante la primera mitad del siglo VI y que el sitio siguió desarrollándose después del evento como lo constata las construcciones de nuevos pisos. La composición geoquímica y mineralógica de materiales volcánicos encontrados en las excavaciones presentan una afinidad composicional intermedia-ácida lo cual contrasta con el volcanismo monogenético circundante; sin embargo es probable que dado que es material retrabajado, parte de la composición mineralógica original haya sido afectada por procesos de transporte y erosión, o bien, se encuentra diluida, dada la mezcla con otras fuentes más ácidas, evidenciado por el dominio de vidrio volcánico con texturas y morfologías heterogéneas. Hasta el momento existe una posible fuente de emisión del material volcánico asociado con el encontrado en la “tierra negra” en el sitio de El Pitayo, que es el evento volcánico de El Infiernillo, ubicado al sur de Michoacán y que tiene un fechamiento de 1500-1370 a.C. (Mahgoub *et al.*, 2017). Sin embargo, la “tierra negra” que cubrió al sitio es posterior a este fechamiento, por lo que cronológicamente no correspondería a una erupción que haya sucedido durante la ocupación del sitio, pero permite asociarla como producto de un deslave del Cerro El Arco, ya que la caracterización geoquímica del vidrio volcánico muestra una afinidad muy cercana a este evento de El Infiernillo.

Palabras clave: tephros, micromorfología, pedogénesis, actividad volcánica.

Received: November 1, 2023; Accepted: May 29, 2024; Published on-line: July 1, 2024.

Editorial responsibility: Dra. Marie Nöelle Guilbaud

* Corresponding author: Thania Alejandra García Zeferino, thaniagarciaarqueo@gmail.com

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.

³ Laboratorio de Geología. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México.

⁴ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.

⁵ Laboratorio de Suelos y Sedimentos. Escuela Nacional de Antropología e Historia. CDMX.

⁶ CNRS-Université Paris 1, Francia.

⁷ El Colegio de Michoacán, Michoacán México.

⁸ Centro INAH Zacatecas. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Zacatecas, México.

Thania Alejandra García Zeferino, Elizabeth Solleiro, Héctor Víctor Cabadas Báez, Sergey Sedov, Serafin Sánchez Pérez, Véronique Darras, Laura Solar Valverde, Luis Octavio Martínez Méndez, Peter Jiménez Betts

<https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2024.63.3.1754>

1. Introducción

La actividad volcánica produce cambios profundos en los paisajes y en los grupos humanos que en ellos habitan, provocando desplazamiento, muertes, pérdidas económicas o de recursos, entre otros impactos negativos (e.g. Annen y Wagner, 2003; Lowe *et al.*, 2012; Grattan y Torres, 2016; Pessina *et al.*, 2023). Sin embargo, también hay evidencia de efectos positivos del vulcanismo en los recursos naturales de una región (Ruiz *et al.*, 2018), ya que provee de nutrientes a los suelos adyacentes (Shoji *et al.*, 1993; Ugolini y Dahlgren, 2002; Takahashi y Dahlgren, 2016). Aunque este aspecto depende en gran medida de la naturaleza y tipo de erupción, ya que una caída de ceniza, que puede ser benéfica para la formación de suelos fértiles, puede ser seguida de un derrame de lava cuya pedogénesis es muy lenta (Bachèlery, 2022), tal como ocurrió con las erupciones del Xitle (Córdova *et al.*, 1994; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2016) o el Parícutín (Inbar *et al.*, 1994). Por lo que, el entendimiento de la historia eruptiva y el comportamiento de la actividad volcánica pasada ayuda a plantear medidas concretas para la resiliencia de las sociedades (Bachèlery, 2022).

Las afectaciones del vulcanismo en sitios arqueológicos resultan de particular importancia, ya que permiten establecer la recurrencia de la actividad, el grado y tipo de afectación y la adaptación de las poblaciones ante este tipo de fenómenos geológicos (e.g. Tryon *et al.*, 2009; Lowe *et al.*, 2012; Durkee y Brown, 2014; McHenry *et al.*, 2016; Alloway *et al.*, 2017). En Mesoamérica, el vulcanismo y sus afectaciones a comunidades prehispánicas también han sido ampliamente documentados (e.g. Siebe *et al.*, 1999; González *et al.*, 2000; Gill y Keating, 2002; Plunket y Uruñuela 2006; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2016; Sheets, 2019; Chédeville *et al.*, 2020). A pesar de que estos estudios han establecido, entre otros aspectos, la cronología y duración de las erupciones, la composición de las emisiones y su peligrosidad aún representan casos puntuales que no permiten determinar con claridad el grado de afectación hacia las sociedades prehispánicas (Sheets, 2019).

En la región occidental de la Faja Volcánica Transmexicana, dentro del campo volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) existen diversas publicaciones que han establecido el impacto del vulcanismo en las civilizaciones antiguas (Mahgoub *et al.* 2017; Chevrel *et al.*, 2016; Reyes-Guzmán *et al.*, 2018; Larrea *et al.*, 2019; Ramírez-Urbe *et al.*, 2019). Sin embargo, en la zona septentrional las investigaciones son más escasas. Una de las limitantes en los estudios arqueológicos-volcánicos es la falta de registros evidentes de los depósitos piroclásticos en la estratigrafía arqueológica, debido a la distancia desde el centro eruptivo, las variaciones climáticas y las tasas de intemperismo de los componentes volcánicos (Sheets, 2019). De manera

particular, el vidrio volcánico es un elemento inestable que se altera rápidamente (Fisher y Schmincke, 1984; Leggo *et al.*, 2001; Wolff-Boenish *et al.*, 2004) como parte de los procesos de pedogénesis (Dahlgren y Ugolini, 1990; Lilienfein *et al.*, 2003), de tal forma que identificar la ceniza volcánica en secuencias sedimentarias se vuelve más complejo. Asimismo, los grupos humanos modifican los materiales mediante procesos de transformación del espacio por parte de los constructores y habitantes de los asentamientos. Esto ocasiona que muchos registros se encuentren retrabajados y pueden ser confundidos por los investigadores con etapas o sistemas constructivos de un sitio (incluyendo apisonados y rellenos, entre otros). Debido a estas limitantes, los estudios micromorfológicos resultan de gran utilidad en los contextos arqueológicos (Courty, 2001) porque permiten registrar y caracterizar las transformaciones que sufren los materiales originales, por cuestiones naturales (pedogénesis) o inducidas (antropización).

En el presente trabajo se exponen dos casos de estudio en sitios arqueológicos mesoamericanos en el occidente de México, del periodo Preclásico-Postclásico tardío (ca. 100-1531 d.C.) y del Clásico (ca. 250-600 d.C.), en los que se encontraron, respectivamente: 1) materiales volcánicos vinculados a una erupción mayor de un estratovolcan en el sitio Cerro del Teúl, en el estado de Zacatecas; 2) materiales volcánicos asociados a una o varias erupciones de volcanes monogenéticos en el estado de Michoacán, en el sitio de El Pitayo. En ambas localidades, se analizaron dichos materiales, principalmente con técnicas micromorfológicas y con apoyo de métodos analíticos, para determinar el impacto del vulcanismo en las sociedades prehispánicas y su nivel de recuperación. Asimismo, planteamos el uso de la ceniza como fuente de materia prima para la edificación en los sitios analizados.

2. Materiales y Métodos

2.1 Marco ambiental y contexto arqueológico

2.1.1 Cerro del Teúl

El asentamiento prehispánico del Cerro del Teúl se localiza en la cabecera municipal de Teúl de González Ortega, en el extremo sur del estado de Zacatecas. La región forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO), con predominio del vulcanismo silíceo, asociado al pulso ignimbrítico del Oligoceno temprano que se distribuye entre los estados de Aguascalientes, Zacatecas y el norte de Jalisco (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Ferrari *et al.*, 2002, 2005; Castillo Reynoso *et al.*, 2022). Teúl se ubica en la Fosa de Tlaltenango

(con una orientación promedio N10°E), flanqueada por los pilares de la Sierra de Los Morones, al este, y la Sierra de Atolinga, al oeste (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999).

Los derrames lávicos del Cerro del Teúl han sido estudiados por Nieto-Obregón *et al.*, 1981, Scheubel *et al.*, 1988 y Moore *et al.*, 1994 quienes los describen como la Andesita Basáltica Teúl proveniente de un volcán escudo denominado Cerro San Vicente, 10 km al norte del poblado de Teúl de González Ortega, asignándoles una edad de 21.8 ± 1.0 Ma. Estas lavas son de grano fino y contienen fenocristales de plagioclasas y olivino (Moore *et al.*, 1994).

En el relieve actual, los suelos dominantes en el área son Phaeozems y Luvisoles (INEGI, 2010), aunque también se presentan suelos lateríticos sobre los derrames de lava antiguos (Moore *et al.*, 1994). El tipo de clima es templado subhúmedo con lluvias en verano con temperatura de 14° a 22°C y con un rango de precipitación de 800 a 1000 mm. La vegetación dominante es el bosque y en menor extensión el pastizal (INEGI, 2010).

Desde el punto de vista arqueológico, el Cerro del Teúl constituye uno de los principales centros ceremoniales prehispánicos del sur de Zacatecas y norte de Jalisco (Solar *et al.*, 2018), dentro de la región conocida como Noroccidente de México (Figura 1b). Las investigaciones arqueológicas extensivas en este sitio, a lo largo de los últimos catorce años, han demostrado una ocupación prolongada desde los inicios de nuestra era hasta el momento de la conquista española (Solar *et al.*, 2018; Jiménez, 2020). A partir del material cultural recuperado en el sitio, se sabe que en los primeros siglos de nuestra era, los habitantes del Cerro del Teúl participaron de la tradición de tumbas de tiro, lo que denota similitudes con regiones al sur y occidente, por ejemplo, con las sociedades del cañón de Bolaños y los valles de Tequila y Atemajac, en Jalisco (Solar, 2010). Posteriormente, el sitio participó en redes de interacción de alcance geográfico más amplio, vinculándose con los grupos de la Cuenca de Sayula, Jalisco, del valle de Malpaso y la región de Chalchihuites, Zacatecas (Jiménez y Darling 2000; Solar y Padilla 2013; Jiménez, 2020). Hacia finales del primer milenio, ante la desestabilización sociopolítica de estas regiones, el Cerro del Teúl reforzó sus lazos hacia el occidente y sur, a partir de lo cual tuvo contactos con las planicies costeras del Pacífico, la sierra y valles nayaritas (especialmente con los sitios de Amapa e Ixtlán del Río) y las cuencas lacustres de Jalisco, mediante su participación en la red de interacción conocida como Aztatlán (Solar *et al.*, 2019; Jiménez, 2020).

El asentamiento prehispánico tiene una extensión aproximada de 66 ha, pero las excavaciones extensivas se han concentrado en una superficie de 5 ha, en donde se localiza el conjunto ceremonial de dimensiones mayores, el cual integra varios complejos arquitectónicos, de los cuales se han explorado la Plaza Princi-

pal, el Patio Hundido, la Explanada Norte, la Terraza Sureste y el Juego de Pelota (ver Solar *et al.*, 2011; Solar *et al.*, 2014). Hasta ahora, se ha ubicado que el momento de mayor actividad constructiva se presentó durante el Posclásico temprano (ca. 900-1200 d.C.).

2.1.2 La región de El Pitayo

El área de estudio se encuentra en el Valle del Río Lerma, cerca de la población de Tres Mezquites, en el norte del estado de Michoacán, a 35 km al norte de la Cuenca de Zacapu (Figura 1A). Forma parte del CVMG, en donde se han identificado más de 1000 volcanes monogenéticos (e.g. Connor, 1987; Hasenaka y Carmichael, 1987; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). El registro de actividad volcánica más antigua en el área data de 2.78 Ma (Hasenaka y Carmichael, 1985) y ha continuado en periodos recientes, incluyendo erupciones históricas como las de los volcanes Jorullo y Parícutín. La región de Zacapu es una estructura tipo graben (Johnson y Harrison, 1990) circundada por volcanes de composición intermedia (Siebe *et al.*, 2013; Reyes-Guzmán *et al.*, 2018), en donde también ha ocurrido actividad silícica esporádica (Kshirsagar *et al.*, 2015). Durante el Holoceno tardío, se han registrado diversas erupciones con afectación a poblaciones prehispánicas en la región, como es el caso de la erupción del volcán El Metate (1250 d.C.) con posible impacto en el sitio arqueológico de Tingambato y en el auge del imperio tarasco, por posibles migraciones ocasionadas por la erupción (Chevrel *et al.*, 2016).

En particular, El Pitayo está rodeado por diversas estructuras volcánicas de composición química y edad desconocida. El sitio arqueológico, específicamente la estructura arquitectónica estudiada, se ubica en el piedemonte del Cerro El Arco, asentado sobre sedimentos coluviales, con pendientes suaves cercanas a los 5° (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). El Cerro El Arco es un volcán tipo escudo mediano, posiblemente monogenético, de composición andesítico-basáltica, con una altitud que varía entre los 1800-2210 m.s.n.m. La planicie aluvial del río Lerma se extiende en la región sur del Cerro El Arco, la cual se caracteriza por ser relativamente estrecha, al estar circundada por estructuras volcánicas (Darras, 2014). Los sedimentos del río son principalmente arenosos y limosos, de composición heterogénea (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021).

El clima predominante es semicálido subhúmedo con lluvias en verano con una temperatura promedio anual de 19°C y un promedio de precipitación de 659 mm. Los suelos dominantes de la región son Vertisoles (INEGI, 2019), los cuales soportan una fuerte actividad agrícola.

El sitio El Pitayo forma parte de las investigaciones arqueológicas realizadas en el norte de Michoacán y sur de Guanajuato

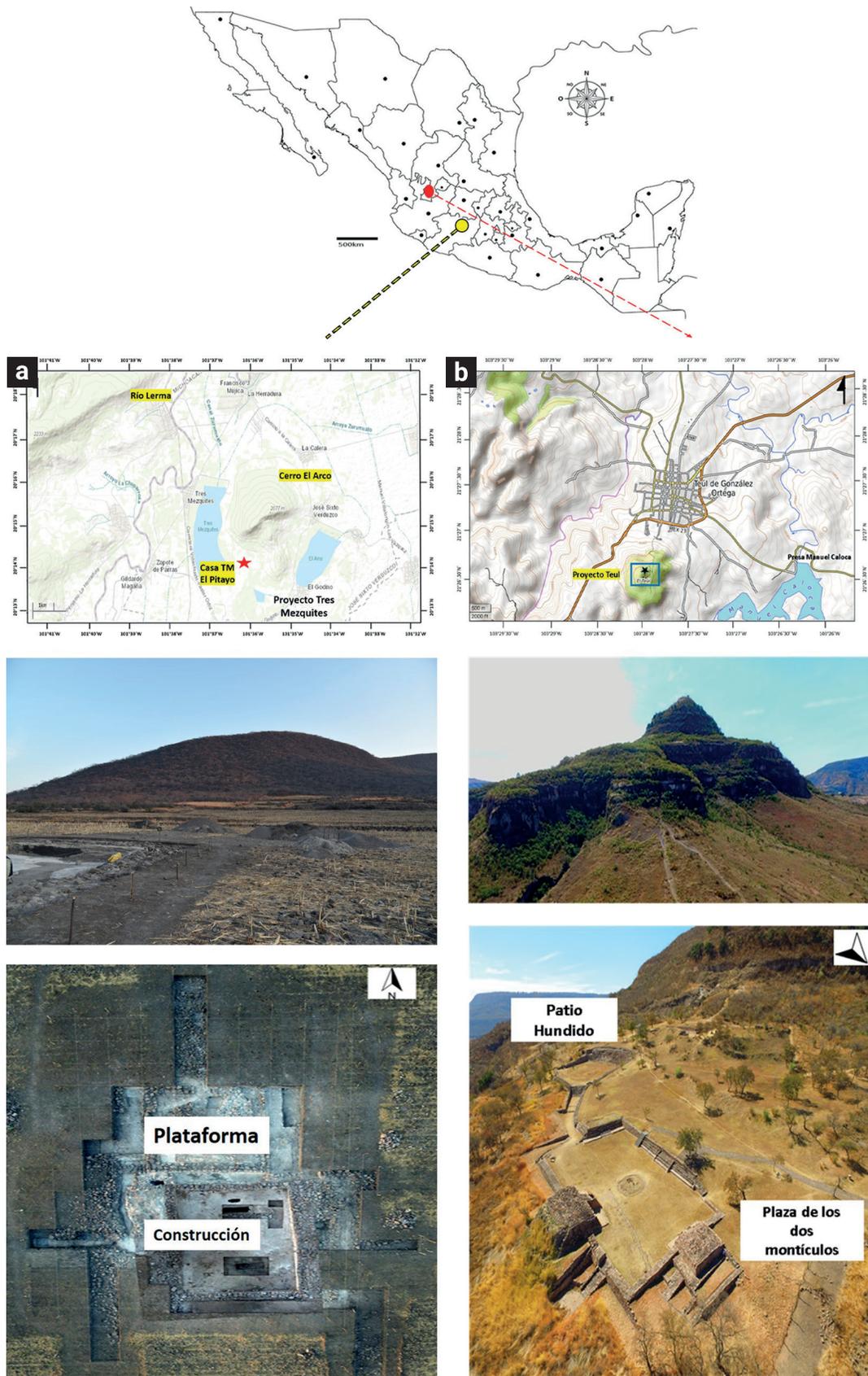


Figura 1. a) Mapa geográfico y vista aérea de las excavaciones en El Pitayo, en la región de Tres Mezquites, Michoacán. b) Mapa geográfico y vista aérea de uno de los conjuntos arquitectónicos principales de Cerro del Teúl, Zacatecas. *Fotografías por Thania García, Véronique Darras, Alejandra Castañeda y Luis Martínez.*

cuyo objetivo se centra en dilucidar los procesos culturales en el Bajío y en el Centro-Oeste de México, en particular con relación a los fenómenos culturales Chupícuaro-Mixtlán-Loma Alta y Barajas (Darras, 2014; Darras *et al.*, 2016, 2017; Castañeda *et al.*, 2020). En el curso de dichas investigaciones se identificaron 192 sitios arqueológicos en la zona de tres Mezquites, con una ocupación desde el Preclásico tardío al Epiclásico (100 a.C. a 900 d.C.), e inclusive, varios relacionados con la época Colonial. Los trabajos realizados en el sitio PA3- El Pitayo (228304 E/ 2240550 N) han sacado a la luz una construcción rectangular del Clásico orientada E-W, con una cimentación hecha de mampostería de piedra y paredes de adobe cubiertas con revestimiento blanco (Darras *et al.*, 2017). La estratigrafía arqueológica de la pared norte del edificio mostró una serie de depósitos con un espesor de 2.5 m, que correspondían a estratos culturales, entre los que destacaron dos pisos de ocupación, gruesos y blancos, separados por un estrato de “tierra negra”. Dicha tierra poseía un mayor espesor en esta pared norte, pero se extendía hacia los costados (paredes oriente y poniente) (Darras *et al.*, 2017). Precisamente en la pared norte, se notaba una fuerte afectación de las paredes de la construcción producida por la tierra negra (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). Los estudios micromorfológicos demostraron que esta “tierra” estaba constituida por fragmentos de suelo con propiedades vérticas mezclados con vidrio volcánico fresco, asociándola a un deslizamiento de tierra, procedente del Cerro El Arco (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). El piso de ocupación afectado por la “tierra negra” contenía abundantes objetos asociados a fogones, como cuencos, ollas, sahumeros, además de herramientas líticas y restos de olotes y frijoles (Darras *et al.*, 2017; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). En este piso también se han excavado dos entierros primarios. La ocupación más tardía también presentaba vestigios arqueológicos variados como un entierro primario y un fogón. El estudio de la historia de estos depósitos y de los hallazgos arqueológicos asociados puso de manifiesto que el edificio y su primera superficie de ocupación habían sufrido una fuerte destrucción, como evidencian diversos indicadores materiales (huellas de incendio, material abundante y quebrado, colapso de muros de adobe, etc.). También muestra que el lugar fue reocupado brevemente por encima de la “tierra negra”, en forma de una estructura ligera de materiales perecederos, seguida de la reconstrucción idéntica al edificio de mampostería y la creación de una nueva planta de ocupación, utilizando los mismos materiales de construcción. El estilo de los materiales cerámicos es exactamente el mismo para ambas ocupaciones. Existen 7 fechas AMS (procesadas en el Centro de Investigación Isotópica de la Universidad de Groningen, Países Bajos) de los diferentes acontecimientos de ocupación/destrucción/reconstrucción (colágeno de los 3 individuos de los entierros y carbón de los fogones y áreas quemadas), las cuales

revelan una contemporaneidad. Su procesamiento bayesiano a través del programa Chronomodel, teniendo en cuenta las sucesiones estratigráficas, permite ubicar los distintos eventos en el intervalo de tiempo (95%) [425;564] AD, y proponer dos MAPs (Pointwise estimates): 510 y 515 AD (Lanos *et al.*, 2018, Darras 2021). Toda la información arqueológica disponible muestra que transcurrió muy poco tiempo entre la primera ocupación del edificio, su destrucción, la reocupación intermedia y su reconstrucción final.

La edad de los materiales arqueológicos asociados dio una temporalidad de finales del Clásico, en tanto que la edad de la tierra arrojó edades más tempranas, 1500 a 2200 a.C. (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). De acuerdo con los autores mencionados, esta edad se debe a la mezcla del vidrio volcánico con los suelos arcillosos más antiguos del Cerro El Arco que se movilizaron como parte de un deslave que cubrió la construcción arqueológica.

2.2 Muestreo y caracterización de los objetos de estudio

2.2.1 Trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se seleccionaron cuatro perfiles dentro de los pozos de excavación, dos del Cerro del Teúl, en los conjuntos arquitectónicos del Patio Hundido y la Plaza Principal (unidades de excavación PH21 y P2M80, respectivamente) y dos en el sitio PA 3- El Pitayo en Tres Mezquites, ubicados en una trinchera con orientación E-W (Trinchera Este y Trinchera Sur). Se describieron, tanto para los rellenos constructivos y pisos arqueológicos como para los materiales naturales (horizontes de suelo y sedimentos): color (en húmedo), textura, estructura, límites entre horizontes y rellenos, porosidad, estratificación, así como contenido de artefactos arqueológicos y fragmentos de roca. Dichos atributos permitieron entender la interacción de los factores formadores y su transformación en el tiempo. La designación de los horizontes y perfiles pedológicos se basó en la Base de Referencia Mundial (IUSS Working Group WRB, 2022).

Se recolectaron dos tipos de muestras en los perfiles dentro de los pozos de ambos sitios (PH y P2M80 en Cerro del Teúl; Trinchera E y Trinchera S en Tres Mezquites):

1. Bloques inalterados para la elaboración de láminas delgadas que fueron usadas para el análisis micromorfológico, ya que se extrajeron conservando su estructura original y su orientación.
2. Material suelto para análisis físicos y químicos, las cuales se secaron a temperatura ambiente, se molieron y tamizaron en malla 200 (diámetro = 0.074 mm).

2.2.2 Análisis de laboratorio

2.2.2.1 Composición química y caracterización del vidrio volcánico

El análisis de la composición química total se llevó a cabo únicamente en dos muestras: la capa de ceniza blanca en el perfil P2M80 de Cerro del Teúl y la muestra del horizonte Ai, en la pared norte de Tres Mezquites, con el fin de determinar la afinidad geoquímica de los materiales de origen volcánico con su posible fuente de origen. El análisis se hizo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) de la UNAM, con un espectrómetro secuencial RIGAKU PRIMUS II de WD-FRX equipado con tubo de Rh.

La caracterización del vidrio volcánico se hizo en las dos muestras referidas bajo el microscopio petrográfico Olympus BX 51, usando la técnica de inmersión, en la que se coloca la muestra en un portaobjetos con una gota de aceite de inmersión con índice de refracción de 1.54.

2.2.2.2 Micromorfología

Los bloques inalterados se secaron a temperatura ambiente y se impregnaron con resina poliéster. Una vez secos se cortaron y se desbastaron con abrasivo (carburo de silicio) hasta obtener un grosor de aproximadamente 30 μm . Las láminas fueron observadas y descritas siguiendo la terminología de Stoops (2003), en el microscopio petrográfico Olympus BX 51 utilizando luz plana (LP) y luz polarizada- nicoles cruzados (NX). Las fotografías se tomaron con cámara CoolSNAP-Pro-Color.

2.2.2.3 Análisis físicos y químicos

La determinación del color se hizo en la muestra total, en húmedo y en seco, usando un espectrómetro Colorlite sph860/sph900 en donde se obtuvieron los datos de L^* (luminosidad, que va de 0 a 100), a^* (variación del color de verde a rojo) y b^* (variación del color de azul a amarillo). Los datos que se muestran en los resultados corresponden únicamente a los valores de las muestras secas.

Para la determinación granulométrica, primeramente las muestras se dispersaron en agua destilada con hexametáfosfato de sodio. Posteriormente, la fracción arena (tamaño entre 2 y 0.063 mm) se separó por tamizado. Las fracciones de limo (0.063–0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm) se separaron mediante sedimentación por gravedad (Ley de Stokes) y pipeta (USDA, 2004).

El contenido de materia orgánica fue obtenido de manera diferente en las muestras de ambos sitios. En el caso del Cerro

del Teúl, la medición se hizo mediante el método de Walkley y Black (1934). En Tres Mezquites, el carbono orgánico total (CT) se determinó usando un analizador UIC modelo CM5012, Chicago, IL, USA, por combustión seca y colorimetría (Huffman, 1977). El porcentaje de materia orgánica (MO) se calculó multiplicando el CT por 1.72, que es el factor de Van Bemmelen.

3. Resultados

3.1 Caracterización de las cenizas de Cerro del Teúl y El Pitayo

La ceniza encontrada en el perfil P2M80 en Cerro del Teúl se caracteriza por presentar porcentajes ponderales altos de SiO_2 (67%), con 15% de Al_2O_3 y bajos porcentajes de TiO_2 (Tabla 1). Tanto el CaO como el MgO también se presentan en proporciones bajas, en tanto que el Na_2O y K_2O exhiben porcentajes más elevados (Tabla 1), lo que le confiere una afinidad a magmatismo ácido.

Si bien, macroscópicamente la capa asociada a la ceniza descrita en Cerro del Teúl presenta una coloración mayoritariamente blanca-gris claro, la presencia de granos oscuros tamaño arena es muy evidente. Microscópicamente, se encontraron diversos fragmentos de líticos de tamaño arena gruesa a media con morfologías angulosas a subredondeadas y texturas porfíricas con matriz microlítica (Figura 2a). Allí se observan mayoritariamente cristales de piroxeno (augita) en forma de fenocristales (300–800 μm) y algunos microfenocristales (100–150 μm), mientras que el olivino es escaso. También hay líticos con texturas micro-criptocristalinas. Con respecto al vidrio volcánico, se trata de la fase más abundante y contrastante en cuanto a sus características ópticas, dadas principalmente por sus rasgos de alteración y su índice de refracción. Se distinguen dos tipos: 1) vidrio incoloro, anguloso a subredondeado, con vesículas elongadas, particularmente con microtexturas fluidales y de astillas (Figura 2b) con bajo índice de refracción, el cual es menor al de la resina; 2) vidrio de coloraciones pardo oscuras ($n >$ resina), incluso rojizas. Este último está asociado a los fragmentos líticos de texturas porfíricas, que están tanto en la matriz de la roca como en fragmentos de tamaño arena gruesa que recubren a los cristales ferromagnesianos y con aparente alteración a minerales de arcilla, pues se observan bajos colores de interferencia, como “halos” que recubren tanto la región externa de las esquirlas como las zonas porosas formando una textura de “relleno de canales” (Figura 2c, 2d).

Con respecto al sitio PA 3 El Pitayo en la zona de Tres Mezquites, a pesar de que no se tiene una muestra de ceniza pura, cuando se analizó por inmersión se identificó que el horizonte

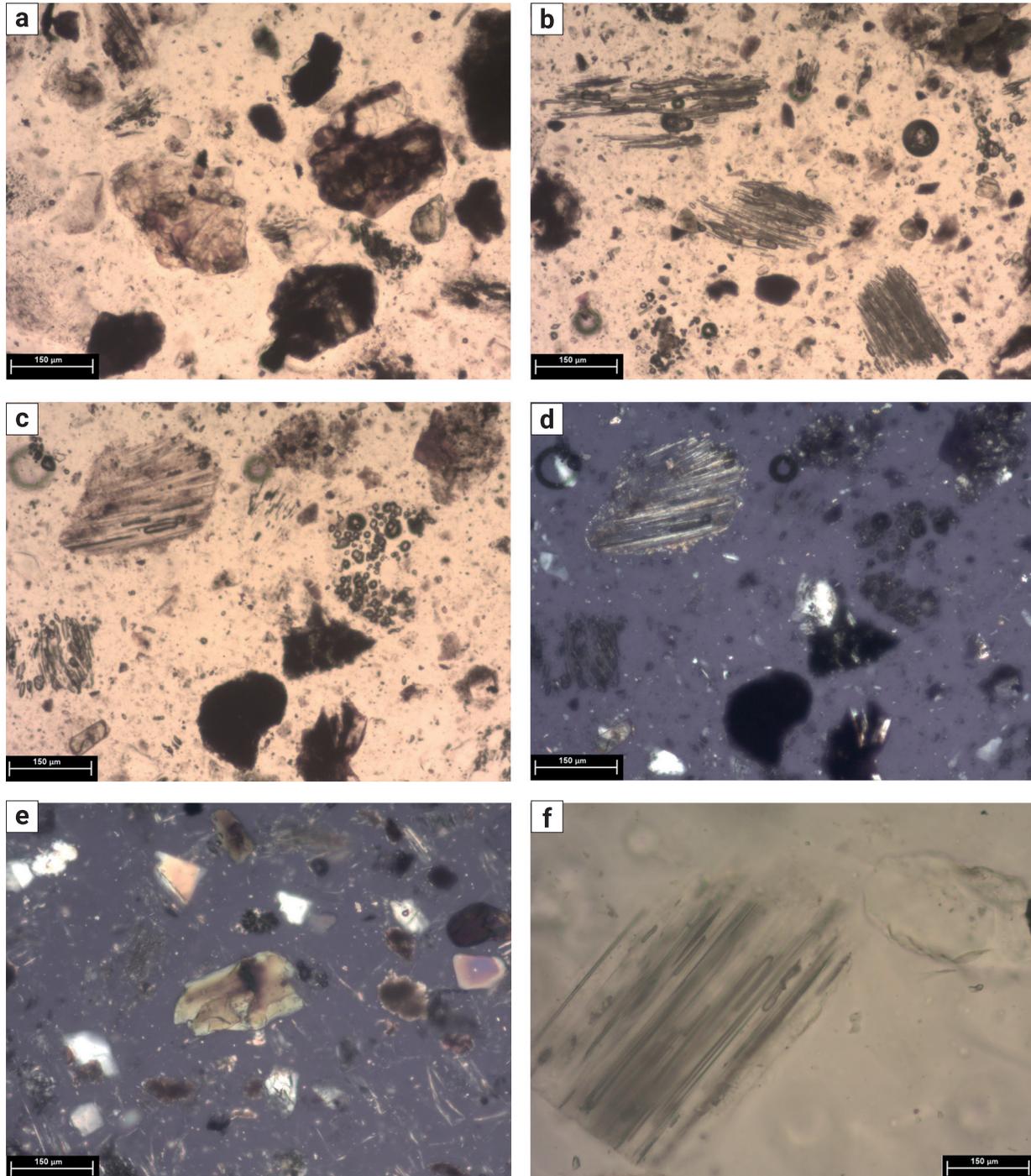


Figura 2. Fotomicrografías de muestra por inmersión de las cenizas de los sitios Cerro del Teúl y El Pitayo. Las abreviaciones corresponden a los tipos de luz del microscopio petrográfico: luz polarizada con nicols cruzados (NX); luz polarizada plana (LP). Cerro del Teúl: a) aspecto general de los materiales piroclásticos, resaltan los líticos pardo-oscuros (asociados a composición máfica) con cristales de piroxeno y su aspecto redondeado (LP); b) detalle de vidrio volcánico de estructura fluidal y morfología astillada, nótese la poca alteración que presenta (LP); c) y d) rasgos de alteración en vidrio de coloración pardo clara con estructura fluidal y aspecto micro-acanalado con alteración (LP), nótese la presencia de colores de interferencia en regiones internas del vidrio y en sus bordes (NX). Sitio El Pitayo: e) aspecto general de los componentes mineralógicos de la ceniza, nótese la presencia de componentes de cuarzo y anfíboles (NX); f) detalle de vidrio volcánico con relieve bajo y estructura fluidal con tonalidades pardo-claras, con alteración incipiente (LP).

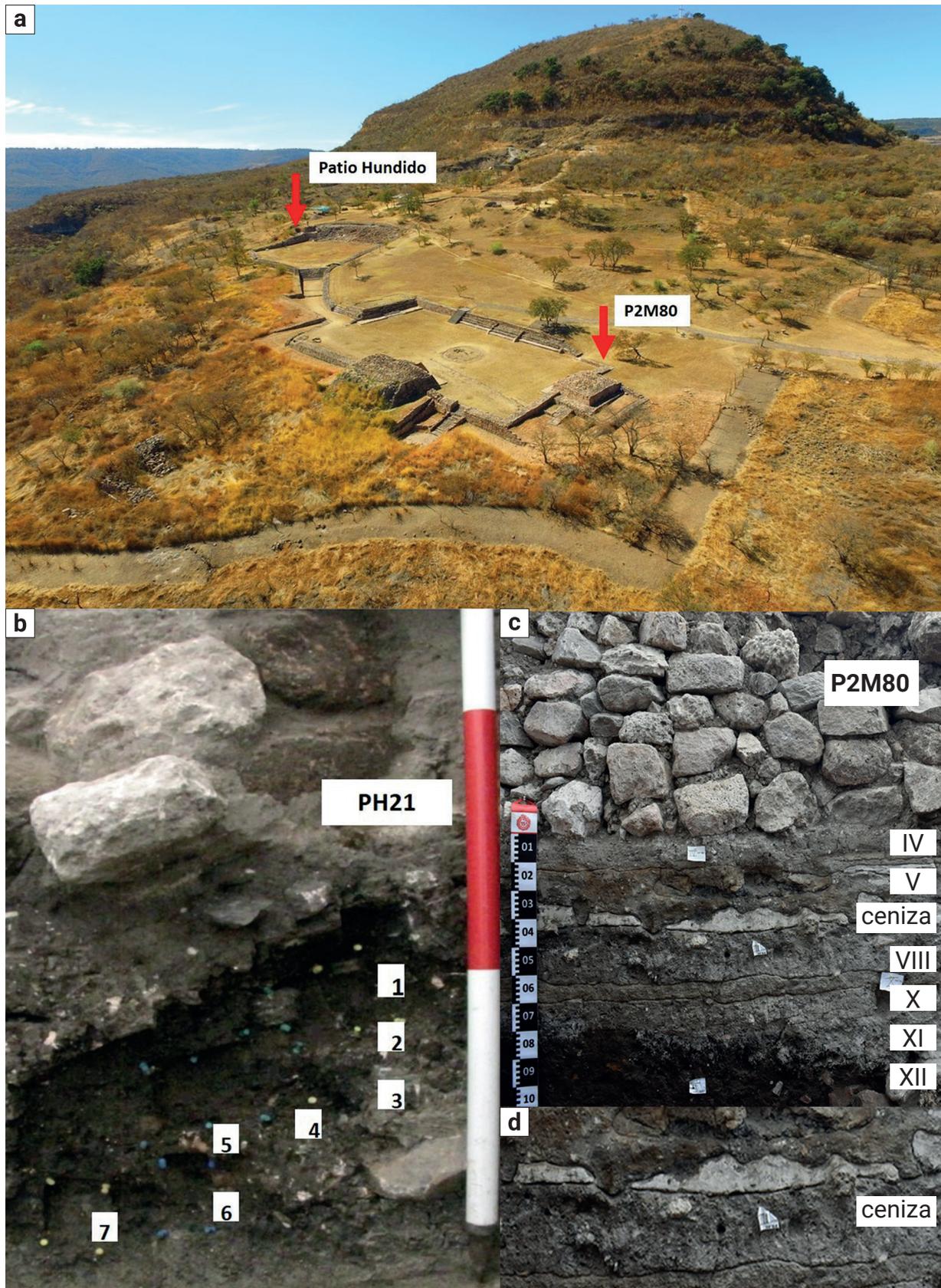


Figura 3. a) Sitio arqueológico Cerro del Teúl, mostrando la ubicación de las dos unidades estudiadas; b) Perfil de la unidad PH21; c) Perfil de la unidad P2M80; d) acercamiento de la capa de ceniza presente en el perfil P2M80. *Fotografías por Luis Martínez y Thania García.*

3.2.1 Observaciones micromorfológicas de los rellenos de Teúl

Las observaciones micromorfológicas de los rellenos constructivos del perfil PH21 muestran una composición heterogénea, incluyendo la cantidad de artefactos. En los rellenos 1 y 2 destaca una matriz fina, con textura limo-arcillosa, con fragmentos de andesita con alteración variable, siendo visibles rasgos en los microlitos de plagioclasa (algunos fragmentos con alteración importante). Asimismo, se observan nódulos anórticos de óxidos de hierro (Figura 4a) y cutanes de arcilla gruesos recubriendo los agregados de suelo y los fragmentos de roca (Figura 4b). En el relleno 3 se tiene un aumento de fragmentos de roca basáltica, pómez (Figura 4c) y vidrio volcánico con estructura fluidal (Figura 4d) y algunos fragmentos de andesita. Una característica del relleno 4 es la presencia de abundantes partículas de carbón (Figura 4e). En los rellenos 6 y 7 se detecta un cambio importante en los rasgos micromorfológicos, ya que, aunque la matriz sigue siendo arcillo-limosa, aumentan las características reductomórficas, con nódulos complejos de óxidos de Fe, cutanes de arcilla (Figura 4f) y de coloraciones más pálidos. En el relleno 7, además, se observa abundante carbón y fragmentos de cerámica arqueológica.

En el caso del perfil P2M80, los rellenos muestran componentes diferentes a los reconocidos en el PH21. En el relleno V, ubicado sobre la capa de ceniza, hay presencia de carbonatos pedogenéticos en la matriz (Figura 5a), así como fragmentos de vidrio volcánico y pómez mezclados (Figura 5b). En el relleno que subyace a la ceniza (relleno VIII) se tiene una variación en el tipo de líticos, ya que se observa un fragmento de cuarcita redondeada (Figura 5c), además de carbón y vidrio volcánico con diferente morfología. Destaca en este relleno el desarrollo de estructura biogénica con agregados granulares (Figura 5d). Los rellenos inferiores (X y XI) se caracterizan por presentar una textura arenosa, con estructura pedogenética incipiente (Figura 5e) en donde se presenta vidrio volcánico (Figura 5f), cerámica y hueso quemado.

3.2.2 Propiedades físicas y químicas

Los rellenos del perfil PH21 arrojaron valores de coloración contrastantes. Los rellenos superiores son los más claros con valores de L^* mayores a 48 y tonalidades más rojizas y amarillentas en los inferiores (Figura 6a). En el caso del perfil P2M80, la variación de color es más evidente (Figura 6b). Los rellenos IV y X son los más claros con valores de L^* superiores a 30 y con valores similares de los vectores a^* y b^* . En el caso de la ceniza su color es muy claro, casi blanco, con valores bajos en a^* y mayores en b^* . Los rellenos inferiores son más oscuros (Figura 6b).

En cuanto a la distribución de tamaño de partícula, en el perfil PH21 los rellenos 4,5,6 y 7 son arcillosos. Esta fracción disminuye en los rellenos 1,2 y 3, los cuales son más limosos (Figura 6a). En el caso del perfil P2M80, los rellenos muestran una textura predominantemente arenosa, con más del 60% en los rellenos más profundos, debajo de la ceniza blanca, la cual muestra 52% de arena, 33% de limo y 15% de arcilla (Figura 6b). Los rellenos suprayacentes a la ceniza son más limosos.

La concentración de la MO en los rellenos superiores de ambos perfiles (PH21 y P2M80) es cercano a 2%, valor que disminuye con la profundidad, hasta mantenerse constante. La ceniza en el P2M80 tiene un porcentaje menor que 1%.

3.3 Los materiales en El Pitayo

Dentro de la trinchera con orientación E-W (Figura 7a, 7b), el perfil Trinchera E (Figura 7c) se caracteriza por presentar un piso como parte de la casa (denominado aquí como piso 1) de 15 cm de espesor, que desplanta sobre la “tierra negra”, en la cual se identifican los horizontes Ai y BcK (Figura 7c). El horizonte Ai (15-36 cm de profundidad) es de color negro, arcilloso, bien estructurado (bloques angulares y granulares). El horizonte BcK es compacto, de color pardo claro, con estructura en bloques subangulares gruesos. Es limoso y se observan carbonatos secundarios y fragmentos de cerámica.

En el perfil Trinchera S se identificaron 4 horizontes (Ap, Ai, 2Ai, 2AB) con un espesor de 72 cm, sobre un piso arqueológico denominado piso 2 (Figura 7d). El horizonte gris oscuro, Ap (0-20 cm), representa la superficie de cultivo actual. A pesar de que tiene una textura fina (arcillo-limosa), se observan algunos fragmentos de pómez intemperizada y material cerámico. El horizonte Ai (20-40 cm) es también de color oscuro. Una de las características más notorias es la presencia de agregados en bloques angulares con facetas de fricción; asimismo, muestra fracturas verticales, en las que se observan fragmentos de cerámica. El horizonte 2Ai (40-55 cm) es muy compacto; su textura es arcillosa y no se detectan artefactos ni fragmentos de roca. El horizonte 2AB (55-62 cm) tiene una textura más arenosa y una consistencia más suave. El piso 2 (62-72 cm) es un material de textura limo-arenosa, con abundante cerámica.

3.3.1 Observaciones micromorfológicas

Las observaciones micromorfológicas permitieron identificar y entender los procesos pedogenéticos y diagenéticos de los horizontes de suelo, así como su relación con los rellenos culturales. En el caso del piso 1, que cubre la “tierra negra” en el perfil Trinchera E, se destaca su composición heterogénea que consiste en fragmentos de suelos retrabajados, con una alineación aparente (Figura 8a), nódulos de arcilla anórticos (Figura 8b)

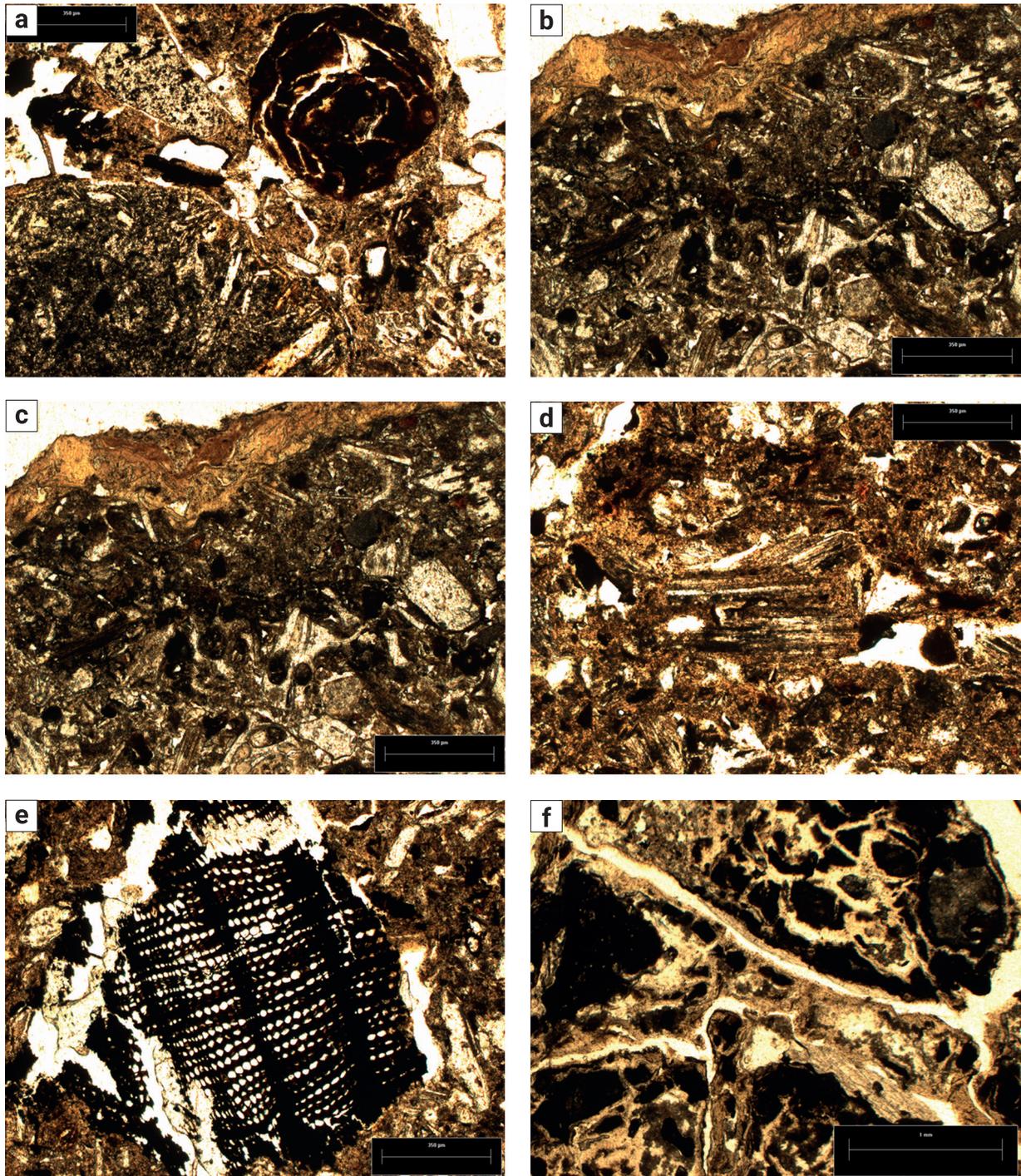


Figura 4. Micromorfología de los rellenos correspondientes al perfil PH21. a) nódulo anórtico de Fe y fragmentos alterados de materiales volcánicos en una matriz fina en el relleno 2 (LP); b) cután de arcilla alrededor de un agregado de suelo en el relleno 2 (LP); c) partículas de pómez alterada en una matriz fina en la que se observan esquirlas de vidrio fresco en el relleno 3 (LP); d) vidrio con estructura fluidal en el relleno 3 (LP); e) fragmento de carbón en el relleno 3 (LP); f) material edáfico con estructura en bloques subangulares, con rasgos reductomórficos (óxidos de Fe), con cutanes de iluviación de color pálido. Las abreviaciones corresponden a los tipos de luz del microscopio petrográfico: luz polarizada con nicoles cruzados (NX); luz polarizada plana (LP).

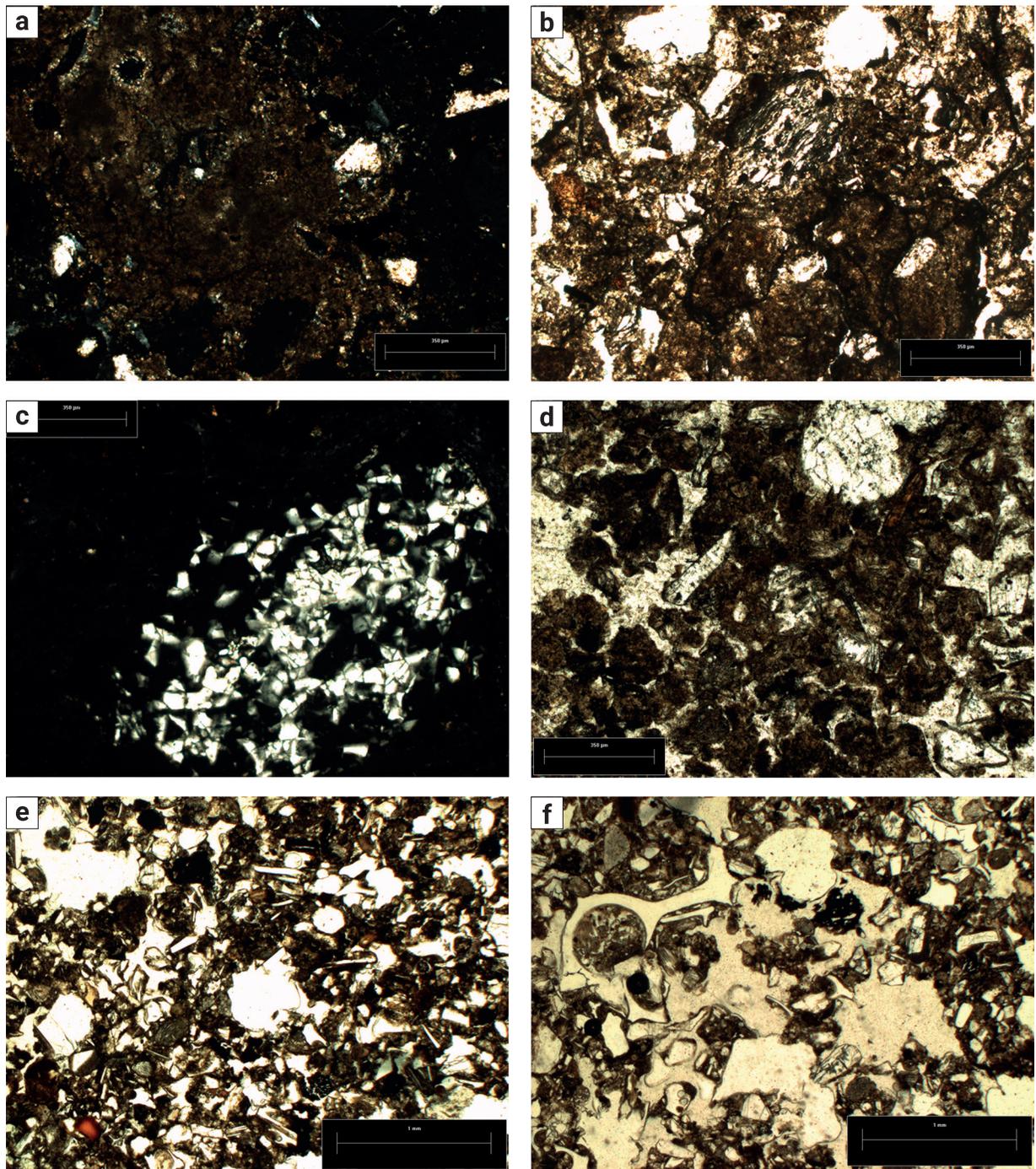


Figura 5. Micromorfología de los rellenos correspondientes a la unidad P2M80. a) carbonatos pedogenéticos observados en el relleno V (NX); fragmentos de vidrio volcánico y pómez mezclados (LP); c) fragmento redondeado de cuarcita en el relleno VIII (LP); d) carbón y esquirlas de vidrio volcánico en el relleno VIII, que muestra el desarrollo de una estructura biogénica (LP); e) agregados de suelo con textura arenosa en el relleno X (LP); f) esquirlas de vidrio volcánico fresco en el relleno X (LP). Las abreviaciones corresponden a los tipos de luz del microscopio petrográfico: luz polarizada con nicóles cruzados (NX); luz polarizada plana (LP).

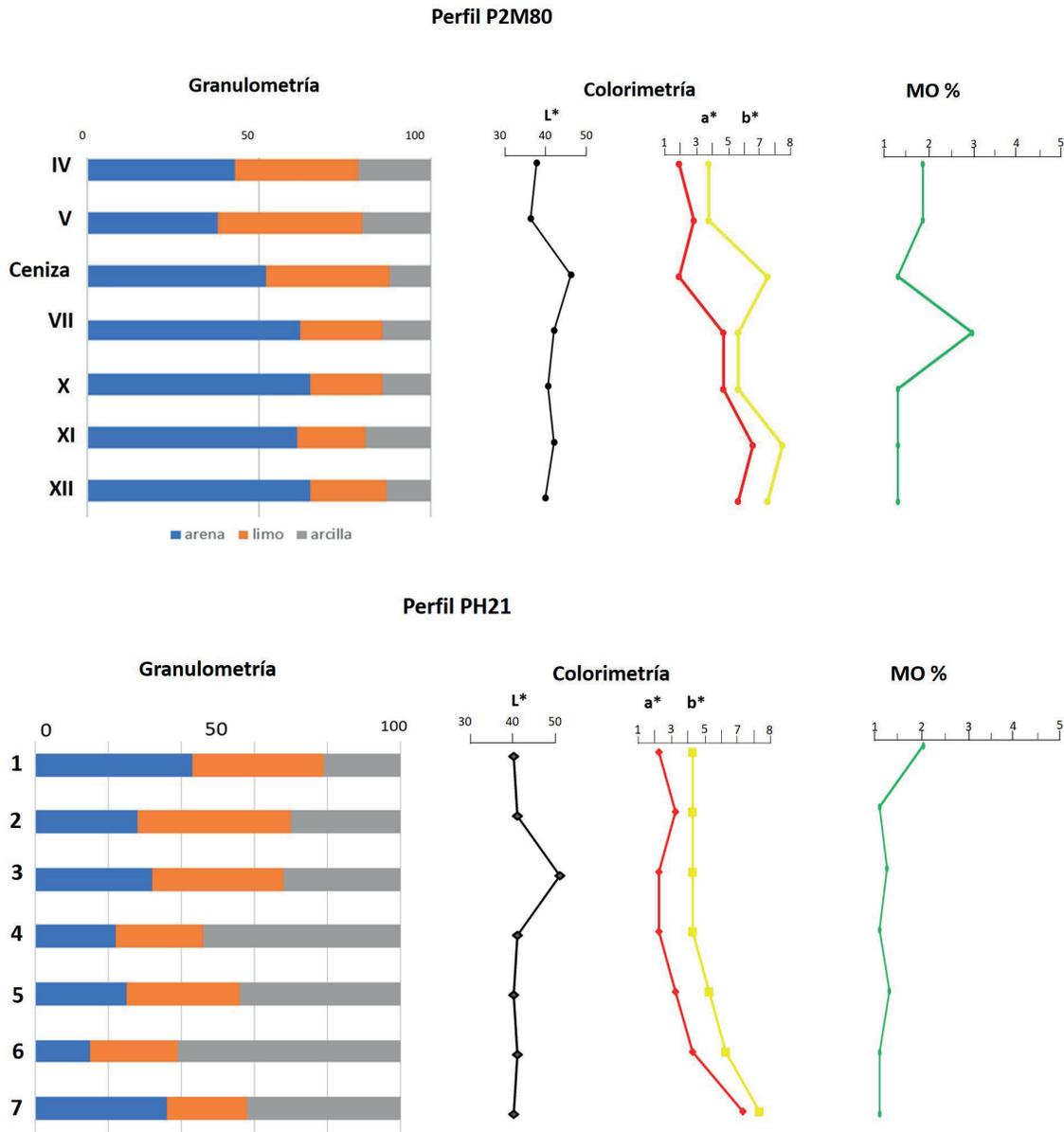


Figura 6. Propiedades analíticas selectas (color, granulometría, materia orgánica) de los perfiles de Cerro del Teúl: PH21 y P2M80.

y abundante vidrio volcánico poco alterado (Figura 8a, 8b). El horizonte Ai, subyaciendo a dicho piso 1, posee una textura más arcillosa y una estructura en forma de bloques angulares los cuales son de color oscuro, pigmentados por humus (Figura 8c). También se observan partículas de vidrio de tamaño limo. En el horizonte BCK de la Trinchera E se observan fragmentos de roca de composición basáltica, nódulos de Fe (Figura 8d), fragmentos de suelo (Figura 8e, 8f) y abundante vidrio volcánico (Figura 8d, 8f). Los fragmentos de suelo también contienen vidrio. El piso 2 (Figura 7d) posee características diferentes a lo identificado en los horizontes anteriores. En dicho piso, la textura es arenosa, en donde dominan el cuarzo y las plagioclasas (Figura 8g), nódulos de Fe (Figura 8g) y carbonatos de origen edáfico (Figura 8h).

3.3.2 Propiedades físicas y químicas

Las coloraciones detectadas en a^* y b^* en ambos perfiles, Trinchera Sur y Trinchera Este (Figura 9) son similares, ya que presentan tonalidades oscuras (L^* menores a 50). Las variaciones de color no son tan evidentes; sin embargo, se nota el cambio radical con los pisos de ocupación del asentamiento prehispánico (Figura 7). Con respecto a la granulometría, los resultados muestran que en los horizontes Ai de ambos perfiles predomina el limo y la arcilla (Figura 9a, 9b); en los horizontes 2Ai y 2AB la arcilla es más abundante. En el caso del perfil Trinchera E no hay mucha variación, aunque en el Piso 1 hay un ligero aumento de la fracción arena. El porcentaje de mate-

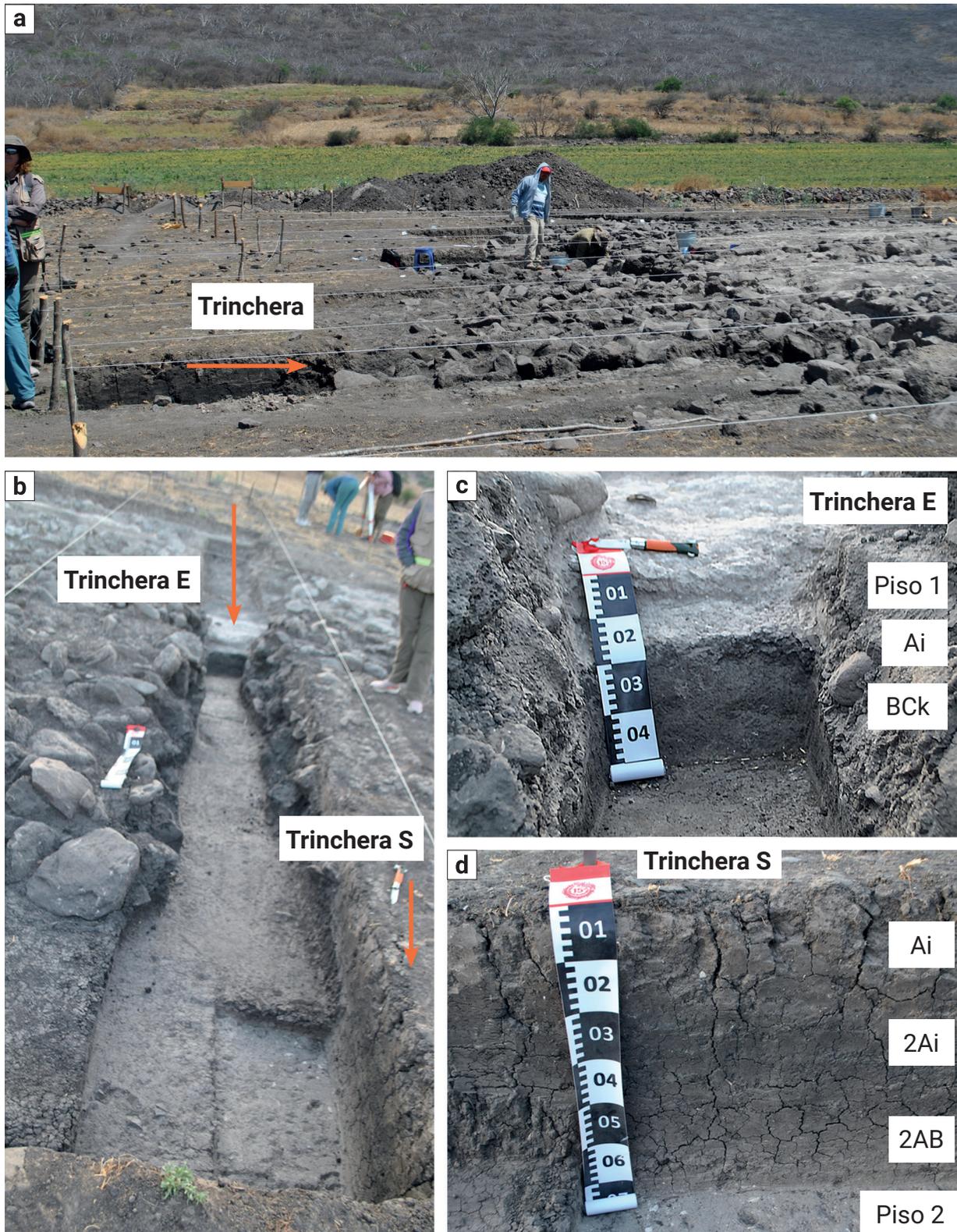


Figura 7. a) Sitio arqueológico PA 3 El Pitayo donde se muestra la localización de la Trinchera E-W, en donde se realizó el muestreo; b) perfil Trinchera E; c) perfil Trinchera E; d) perfil Trinchera S. Fotografías por Jaime Díaz.

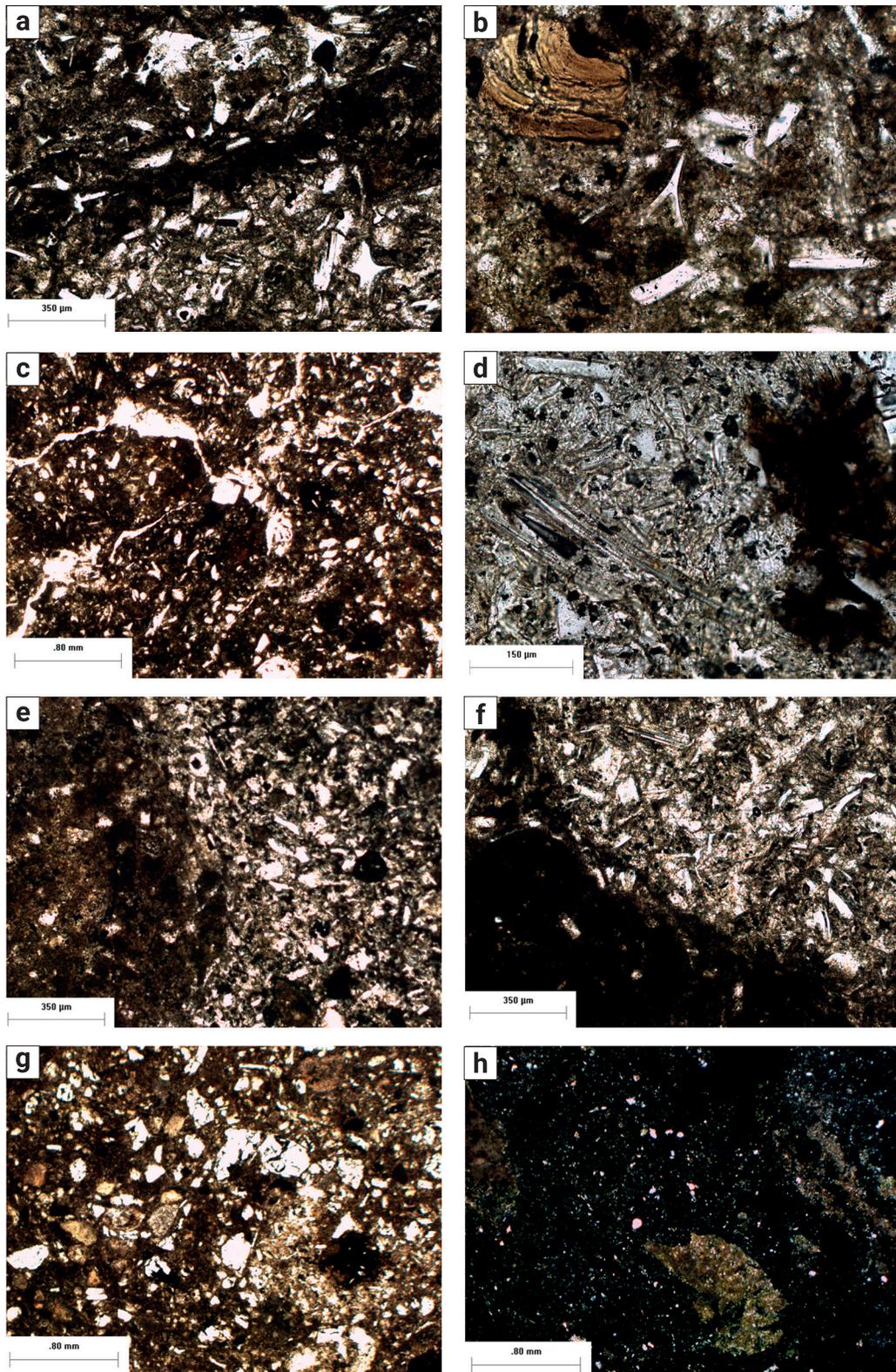


Figura 8. Micromorfología de los materiales encontrados en El Pitayo. Trinchera E. a) alineamiento del piso superior con restos de suelo negro y partículas de vidrio volcánico fresco (LP); b) nódulo de arcilla anórtico con esquirlas de vidrio volcánico en el piso superior (LP); c) horizonte Ai debajo del piso con estructura en bloques angulares pigmentados con humus (LP; d) horizonte BCk con fragmentos de roca basáltica y vidrio volcánico fresco (LP); e) fragmento de suelo redondeado con abundante vidrio volcánico (LP). Trinchera S: f) piso inferior mostrando una matriz arenosa con cuarzos y plagioclasas como minerales dominantes y nódulos anórticos de Fe (LP); g y h) carbonatos pedogenéticos en el piso inferior (NX). Las abreviaciones corresponden a los tipos de luz del microscopio petrográfico: luz polarizada con nicols cruzados (NX); luz polarizada plana (LP).

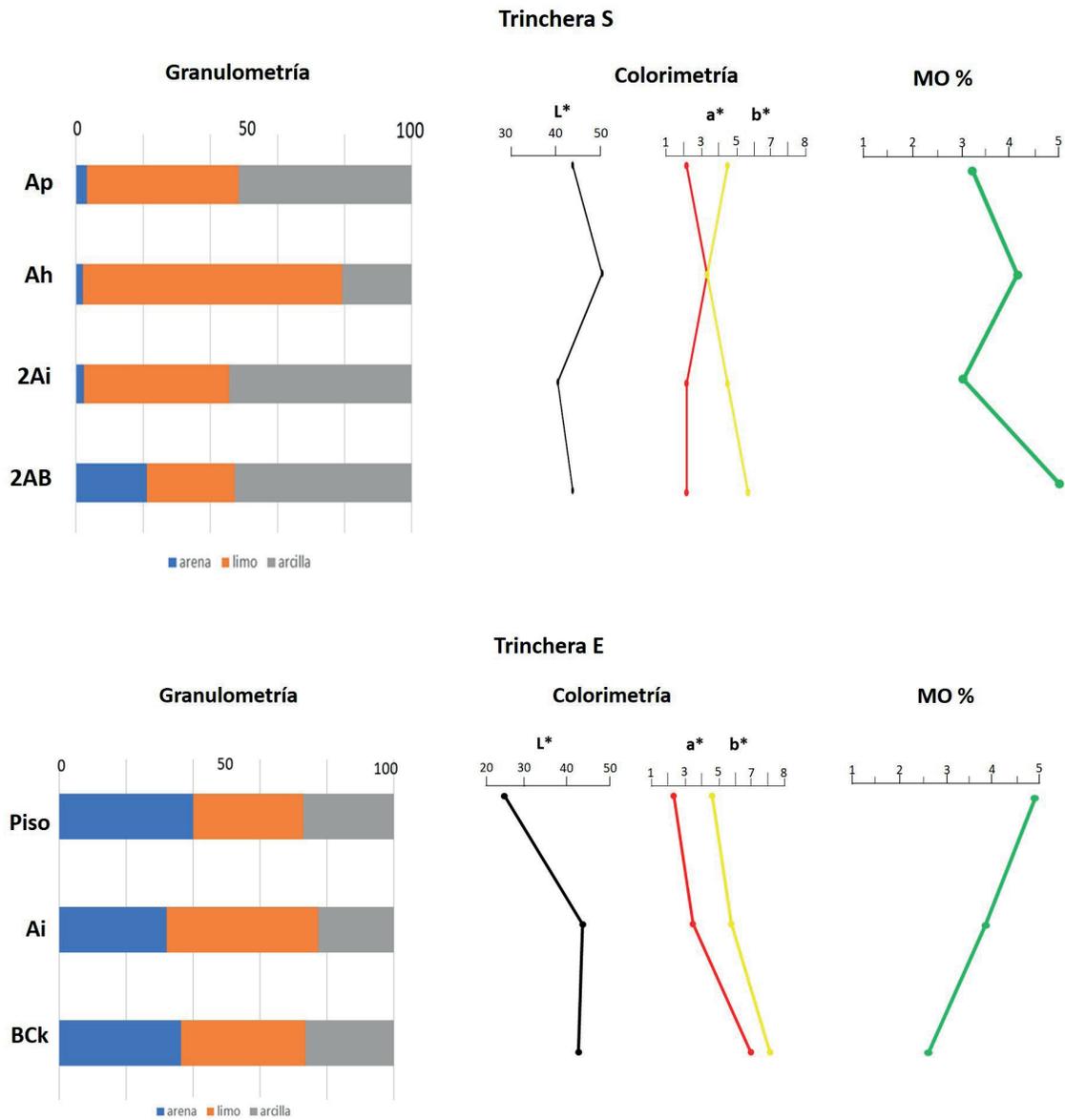


Figura 9. Propiedades analíticas selectas de los perfiles de El Pitayo: Trinchera E y Trinchera S.

ria orgánica en el Piso 1 y en el horizonte 2AB de Trinchera S alcanza 5%, a diferencia del resto de los horizontes donde el valor oscila entre 2 y 4% (Figura 9).

4. Discusión

4.1 Tefra volcánica "escondida" en el contexto arqueológico y su posible fuente de origen

El impacto de las erupciones y las consecuencias posibles para el desarrollo de las poblaciones antiguas han quedado registradas en las excavaciones arqueológicas de los sitios estudiados,

presentándose evidencias de dos tipos: 1) afectación por una fuente de emisión lejana, sin transformaciones por efecto de procesos naturales o antrópicos; 2) mezcla o retrabajo del vidrio volcánico como consecuencia de los procesos exógenos debido a la exposición a procesos superficiales. En el Cerro del Teúl la ceniza volcánica se detecta a simple vista, sobreyaciendo a los rellenos constructivos y subyaciendo a las edificaciones con muros de roca (Figura 3). En las observaciones petrográficas de la ceniza en P2M80 destaca la presencia de vidrio con estructuras fluidales y astilladas (Figura 2c, 2d), que son similares a las reportadas por Sieron (2009) para la erupción pliniana Jala del Ceboruco y con afinidad geoquímica, mostrando una composición dacítica (Figura 10) documentada también por Sieron

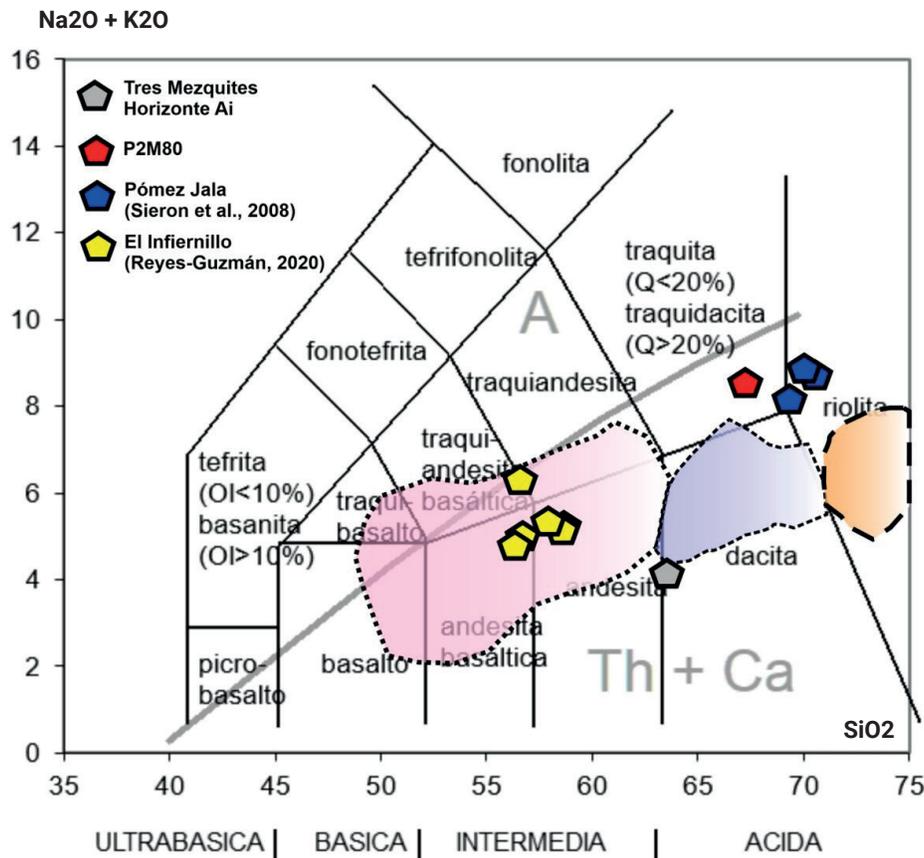


Figura 10. Diagrama TAS para la ubicación geoquímica de las muestras mencionadas en el texto y su posible afinidad geoquímica con una posible fuente. Las regiones delimitadas con líneas punteadas son las referentes a las agrupaciones de las composiciones de rocas del Campo Volcánico de Michoacán-Guanajuato definidas por Sosa-Ceballos *et al.* (2021).

(2009). Dada su similitud petrográfica y geoquímica (Figura 10), es posible correlacionarla con la erupción Jala, datada en 990-1020 d.C. a partir de las dataciones realizadas por Nelson (1980) y Sieron y Siebe (2008) en carbones encontrados en paleosuelos y dentro del depósito piroclástico.

La correlación entre la ceniza blanca y la erupción Jala es importante, porque no solamente permite la identificación de la fuente de emisión, sino que representa un marcador estratigráfico dentro del sitio y sus alrededores (Solar *et al.*, 2021). Esta erupción tuvo un nivel de explosividad VEI6 (Gardner y Tait, 2000; Browne y Gardner, 2004), con consecuencias devastadoras hacia el paisaje y poblaciones aledañas (Sieron, 2009). Sin embargo, en el Cerro del Teúl, con una ocupación casi continua desde el Preclásico hasta el momento del contacto con los españoles (ca 100 a.C. a 1530 d.C.), se puede estipular que esta caída de material no indujo a un abandono. Esta consideración está basada en los siguientes argumentos: 1) el espesor menor a 11 cm de la capa de ceniza con un contacto plano y abrupto con el relleno inferior (Figura 2c) que indican un depósito piroclástico de caída, con una velocidad de deposición relativamente rápida;

2) el contacto irregular entre la ceniza y el relleno V, debido a la manipulación antrópica, ya que el relleno integra restos de la ceniza (Figura 3), que bajo el microscopio aparece como material edáfico mezclado con vidrio, el cual tiene una estructura fluidal similar a la encontrada en la ceniza (Figura 2b, 4d); y 3) la ausencia de pedogénesis directamente en la ceniza, ya que no hay desarrollo de estructura biogénica ni evidencia de que el vidrio esté intemperizado (Figura 2a, 2b, 2c), a pesar de que es un elemento termodinámicamente inestable que se altera rápidamente (Fisher y Schmincke, 1984; Leggo *et al.*, 2001; Wolff-Boenish *et al.*, 2004). Comparativamente, después de 25 años de ocurrida la erupción del Chichón en el sur de México, la ceniza muestra poco intemperismo y, como rasgo notable, una ligera acumulación de materia orgánica (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2007). En contraste, en Indonesia, la erupción de 1815 del volcán Tambora ha desarrollado suelo en un periodo de 200 años (Anda *et al.*, 2023). A pesar de que las condiciones climáticas son diferentes en los sitios referidos (tropical húmedo) que contrastan con las presentes en Teúl (templado húmedo), es posible establecer un marco de referencia para el desarrollo

pedogenético. La ceniza del Cerro del Teúl, procedente de la erupción Jala, no tiene ningún rasgo asociado a la formación de suelo, por lo que suponemos que el relleno V (perfil P2M80) se colocó casi inmediatamente después de la erupción.

La distribución de la ceniza en el sitio del Teúl es muy irregular, por lo que en algunos pozos de excavación se observa más compacta y está presente en todas las paredes de los pozos; mientras que en otros casos es discontinua y puede aparecer con espesores menores e, inclusive, no estar presente. La pregunta que emerge de estas observaciones es si su presencia está relacionada al uso de los espacios abiertos y cerrados en el sitio, a los tipos de construcciones, o bien, si fue colocada intencionalmente y es ajena al proceso de depósito de caída en forma natural. En el caso del Patio Hundido (PH21) no aparece esta capa gruesa de ceniza como en P2M80 (Figura 3b); sin embargo, se considera que el relleno 3 es una mezcla de ceniza (Figura 3b, Figura 6a) y fragmentos de pómez con los agregados de suelo (Figura 4c, 4d), lo que sugiere la utilización intencional de este material como relleno constructivo en el sitio.

Otro rasgo interesante observado en los rellenos inferiores (relleno VIII y X) de la unidad P2M80 es la presencia de partículas de vidrio inalterado, con rasgos petrográficos diferentes a los del depósito Jala (Figura 5f), lo que quiere decir que, además de los materiales volcánicos procedentes de esta erupción, hubo otras erupciones que tuvieron impacto en el sitio, pero que se encuentran “ocultas” entre los rellenos constructivos.

En el caso de El Pitayo, el material volcánico es de tamaño arena media a limo y está incorporado en la estructura de la “tierra negra”, siendo prácticamente imperceptible a nivel macroscópico (Figura 7e, 7f). Solleiro-Rebolledo *et al.* (2021) consideraron que esta “tierra negra” fue originada por un deslizamiento provocado, quizá, por actividad sísmica, desde el Cerro El Arco, que arrastró material volcánico que se encontraba en la superficie y que se combinó con el suelo tipo Vertisol presente en la ladera del cerro. Dada la ubicación temporal de los materiales arqueológicos encontrados en el piso 2, el cual está cubierto por la “tierra negra” (fin de la fase Loma Alta 3 (350-550 d.C.) y durante el intervalo de tiempo a 95% 425-564 A.D), el deslizamiento, cuyo registro no es tan evidente, debió ocurrir alrededor de esa temporalidad, ya que las partículas de vidrio se encuentran muy frescas a pesar de ser un elemento inestable, que no permanece en los suelos por mucho tiempo como parte de los procesos de pedogénesis (Wada, 1985; Dahlgren y Ugolini, 1990; Gracheva *et al.*, 2001).

La remoción de materiales, asociados a la actividad volcánica (directa o indirectamente), y sus afectaciones a la población prehispánica se han registrado en diversos sitios de Mesoamérica (e.g. Macías, 2005; Macías & Arce, 2019). Siendo de los más conocidos, los relacionados a los estratovolcanes del centro de

México (e.g. Siebe *et al.*, 1996; 2006), del Cinturón Volcánico Chiapaneco (e.g. Espíndola *et al.*, 2000; Scolamacchia & Capra, 2015) o del Arco Volcánico de Centroamérica (e.g. Macías *et al.*, 2018). Para la región, se tienen registros en Pátzcuaro (Pola *et al.*, 2014), aunque no pertenecen al marco cronológico prehispánico. Sin embargo, cabe la posibilidad de que el deslave relacionado con la “tierra negra”, sea parte de un registro de lahares secundarios (Zaragoza *et al.*, 2020), vinculados a mecanismos como la actividad sísmica regional del sistema Pátzcuaro-Acambay (Garduño-Monroy *et al.*, 2009) y sus subsistemas (Soria-Caballero *et al.*, 2021), los cuales continúan bajo investigación.

Desafortunadamente, la edad de la “tierra” no es útil para determinar cuándo ocurrió la erupción, ya que registró una datación por radiocarbono de 1500 a 2200 a.C, debido a su mezcla con material de suelo con un largo periodo de pedogénesis (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). De acuerdo a la información publicada sobre emisiones del CVMG, no se ha encontrado registro que coincida en edad, a pesar de la intensa actividad monogenética durante el Holoceno (Chevrel *et al.*, 2016; Mahgoub *et al.*, 2017; Reyes-Guzmán *et al.*, 2018). Existen tres erupciones relativamente cercanas a El Pitayo: El Capaxtiro (200-80 a.C.), Malpaís Prieto (830-960 d.C.) y El Infiernillo (1500-1370 a.C.) que ocurrieron en la cuenca de Zacapu, 35 km al sur. (Mahgoub *et al.*, 2017). Esta última, aunque no corresponde con la temporalidad de ocupación del sitio, si existe afinidad con el vidrio volcánico encontrado con la “tierra negra”. Existe también la posibilidad de que el material volcánico haya viajado desde fuentes lejanas como, por ejemplo, desde el volcán Krakatoa o el volcán del lago Ilopango, que tienen edades de 535 d.C. y 539-540 d.C. y las cuales coinciden con la ocupación del sitio (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2021). No obstante, el aporte de estos materiales piroclásticos puede ser más especulativo, siendo más difíciles de detectar en un tamaño de grano más fino (dadas las amplias distancias a sus puntos de emisión), así como sus firmas químicas y mineralógicas, que pueden diluirse entre el volcanismo cuaternario dominante en la región.

Una particularidad de la composición química de la “tierra negra” de El Pitayo, es su similitud con la geoquímica reportada para las erupciones del CVMG (Figura 10). En este sentido, considerando que la composición de este material es andesítica-dacítica, su afinidad geoquímica pareciera más cercana a lo reportado para rocas intermedias de la región. La cercanía cronológica y espacial de emisiones de El Infiernillo (1490-1380 a.C.) (Reyes Guzmán *et al.*, 2018) sugieren la probabilidad del aporte de sus tefras. Sin embargo, la composición general de sus magmas es más máfica (con presencia importante de olivino, piroxenos, plagioclasa y ocasionalmente hornblenda). Esto es un importante contraste con lo detectado en la muestra del horizonte Ai, donde, si bien el cuarzo y la hornblenda están presentes en

trazas, es dominante la presencia de pómez de texturas muy heterogéneas, así como de sus esquilas.

Para las muestras de El Infiernillo, Reyes-Guzmán (2020) y Reyes-Guzmán *et al.* (2021), reportan xenocristales de cuarzo (algunos como fenocristales y con bordes de piroxeno), hornblenda opacitizada, plagioclasa con texturas de tamiz y glomeropórfidos de anfíbol-piroxeno. Ninguno de dichos rasgos particulares, fueron observables en la muestra del horizonte Ai, pero si hay evidencia de que el material fue afectado por erosión e intemperismo asociados a retrabajo; por ejemplo, el cuarzo muestra morfologías subredondeadas, lo que sugiere procesos de transporte.

4.2 Los materiales arqueológicos: ¿es la ceniza parte de la materia prima de edificaciones?

En el sitio de Cerro del Teúl, no se han abordado las posibles fuentes de los materiales usados en los diferentes rellenos aquí presentados. Lo primero que salta a la vista es la diferencia que existe entre los rellenos de PH21 y el de la unidad P2M80 (Figura 3), tanto en las propiedades analíticas estudiadas (Figura 6a, 6b) como en los rasgos micromorfológicos (Figura 4 y 5). En el PH21 destaca la presencia de material fino, sobre todo arcilla (Figura 6a), con cutanes de iluviación gruesos (Figura 4a, 4b, 4c) y abundantes rasgos reductomórficos (Figura 4a, 4f) y una menor proporción de minerales volcánicos, sobre todo vidrio. Al parecer se usaron suelos con un alto grado de desarrollo, como pueden ser Luvisoles, los cuales se encuentran en las inmediaciones del Cerro del Teúl (INEGI, 2010). Asimismo, dada la presencia de humedad en la parte inferior del perfil PH21 (Figura 3a), es posible que parte del suelo in situ con fuerte acumulación de óxidos de Fe se haya usado como desplante para el posterior desarrollo constructivo, adicionando los materiales arqueológicos. Como se ha mencionado, en el relleno 3 se observan restos de partículas de vidrio con textura fluidal, similares al presente en la ceniza blanca (Figura 2b, 2c, 2d), lo que evidencia que la ceniza Jala se mezcló con material edáfico del tipo Luvisol.

La unidad P2M80 muestra características muy diferentes en sus rellenos, pues todos ellos poseen una textura más arenosa. Los rellenos inferiores tienen fragmentos de vidrio que no se presentan en el PH21 y no hay restos de suelos arcillosos ni rasgos reductomórficos. Incluso se presenta material de procedencia lejana, con fragmentos de cuarcita (Figura 5c) y carbonatos pedogenéticos (Figura 5a). Sin embargo, aquí es difícil precisar si estos carbonatos fueron formados in situ, debido a la colocación del muro con estuco (Figura 3c) que pudo haber lixiviado carbonatos hacia el relleno V, o si venían de algún lugar fuera del sitio arqueológico. En el relleno VIII se observa un aumento en el contenido de materia orgánica (Figura 6b) acompañado con

el desarrollo de estructura biogénica (Figura 5d), lo que permite suponer que hubo un periodo en que este relleno estuvo expuesto en la superficie y fue afectado por procesos de pedogénesis previos al depósito de ceniza. Es importante mencionar que el proceso de acumulación de materia orgánica ha sido bien documentado y, aunque es relativamente rápido, en algunos casos requiere 200 años para su acumulación (Wada, 1985; Gracheva *et al.*, 2001; Anda *et al.*, 2023).

En El Pitayo, el piso arqueológico superior (Piso 1), el cual fue reconstruido después de la destrucción, ubicado en la Trinchera E (Figura 7b) tiene una gran cantidad de vidrio volcánico (Figura 8a, 8b) y una granulometría muy parecida a la que exhiben los horizontes que le subyacen (Figura 9a). En contraste, el piso inferior (Figura 7c), que estuvo ocupado al momento de la destrucción, presenta una textura arenosa, con granos minerales inmersos en una matriz fina pigmentada con humus (Figura 8g) (Figura 9b) y con presencia de carbonatos pedogenéticos (Figura 9h), además de una matriz arenosa con cuarzos, plagioclasas y nódulos anórticos de Fe. Estas características tienen similitud con las registradas en los sedimentos que se encuentran cerca del cauce del Lerma y en los suelos de la región (Solleiro-Rebolledo *et al.* 2021). Lo que hace suponer que el vidrio volcánico que se encuentra en el piso superior no estaba presente cuando se construyó el piso inferior, es decir el que estaba ocupado cuando posiblemente ocurrió el deslave que cubrió la construcción.

De esta forma, se puede concluir que el material volcánico representa un recurso importante como material constructivo en los sitios arqueológicos analizados y que, desde el punto de vista de las afectaciones del vulcanismo a las sociedades, estos contextos son una fuente de información relevante.

5. Conclusiones

Los materiales arqueológicos encontrados en los sitios con vulcanismo activo representan una fuente de información sobre la ocurrencia de eventos cuyos productos pueden quedar “escondidos” y ser usados adicionalmente por los vulcanólogos para medir el impacto de una erupción.

Los casos que se presentan corresponden a dos tipos: 1) afectación por una fuente de emisión lejana, sin transformaciones por efecto de procesos naturales o antrópicos (principalmente observado en el Cerro del Teúl); 2) mezcla o retrabajo de vidrio volcánico como consecuencia de procesos superficiales (correspondiente al sitio Tres Mezquites).

En el caso de Cerro del Teúl, se observa con claridad la presencia de una capa de ceniza de color claro en el perfil P2M80, cuyas características petrográficas y geoquímicas sugieren que

procede de la erupción Jala, del Ceboruco, datada en 990-1020 a.D, lo que coincide con la cronología relativa de los materiales arqueológicos. Sin embargo, consideramos que esta ceniza no causó abandono del sitio, ya que se encuentra mezclada en los rellenos posteriores a la erupción. Además, esta ceniza no presenta rasgos de intemperismo, a pesar de que el vidrio volcánico es un elemento termodinámicamente inestable que se altera fácilmente como resultado de la pedogénesis. Por otro lado, en este mismo sitio, se documenta la presencia de vidrio en rellenos más antiguos lo que sugiere la incidencia de otras erupciones cuyas evidencias han quedado “escondidas” en el registro arqueológico.

En el sitio El Pitayo, el vidrio volcánico está mezclado con los suelos naturales de coloración oscura (Vertisoles) que dominan el paisaje de la región. Sin embargo, gracias a las técnicas micromorfológicas, fue posible su identificación como parte de una “tierra negra” que causó afectación parcial de la estructura arquitectónica. Dado que el vidrio volcánico no está intemperizado y no se registró en los pisos más antiguos de la estructura, el deslave debió de haber ocurrido inmediatamente después de la destrucción del primer edificio (paredes de adobe) durante la primera mitad del siglo VI (edad de los materiales arqueológicos datados por radiocarbono). La erupción de El Infiernillo (1490-1380 a.C.), en el sur de la cuenca de Zacapu, sugieren la posibilidad de ser la fuente de emisión del vidrio volcánico identificado y caracterizado geoquímicamente en la “tierra negra” del de la afectación de sus tefras en el sitio de El Pitayo y aun cuando la cronología no corresponde con la ocupación del sitio, y el deslave que afectó a la población. Además, tanto la afinidad geoquímica máfica de dicho evento, como su mineralogía, son muy contrastantes con lo encontrado en el horizonte Ai de la excavación, ya que el proceso de retrabajo, pudo generar la pérdida de fases minerales meta-estables, y sus texturas, y dejar solo los relictos más inalterables, como el cuarzo. Uno de los contrastes más claros es el dominio de pómez y esquirlas de vidrio de estructuras y texturas muy heterogéneas, lo que abre la posibilidad de un origen u orígenes diversos, incluyendo el volcanismo poligenético.

A pesar de que en ambos sitios arqueológicos hay diferencias geomorfológicas, las evidencias de actividad volcánica y los incipientes procesos de pedogénesis pueden ayudar a establecer momentos de ocupación del sitio, así como el manejo de los materiales utilizados para la construcción de los edificios arquitectónicos.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada con el proyecto PAPIIT

IN110323 (E. Solleiro-Rebolledo). Se agradece al M. en C. Jaime Díaz por su colaboración en el trabajo de campo, los análisis de laboratorio y la elaboración de las láminas delgadas. Asimismo, se hace patente el reconocimiento al Biol. René Alcalá y al Ing. Rufino Lozano, ambos del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía de la UNAM, por su apoyo técnico. A la Mtra. Ofelia Beltrán del Laboratorio de Biogeoquímica y Materia Orgánica del Suelo por los análisis de materia orgánica de las muestras de Tres Mezquites, Michoacán. Al Proyecto Arqueológico Cerro del Teúl del INAH y al Proyecto Arqueológico Tres Mezquites del CEMCA y del CNRS. Hacemos nuestro reconocimiento al apoyo brindado por el Laboratorio de Suelos y Sedimentos de la Escuela Nacional de Antropología e Historia. Finalmente, agradecemos a los revisores del artículo así como a la Dra. Marie-Noelle Guilbaud por sus valiosos aportes y comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito.

6. References

- Alloway, B.V., Andreastuti, S., Setiawan, R., Miksic, J., & Hua, Q. (2017). Archaeological implications of a widespread 13th Century tephra marker across the central Indonesian Archipelago. *Quaternary Science Reviews*, 155, 86-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.11.020>
- Anda, M., Purwanto, S., Dariah, A., Watanabe, W., & Dahlgren, R. A. (2023). A 200-year snapshot of soil development in pyroclastic deposits derived from the 1815 super explosive eruption of Mount Tambora in Indonesia. *Geoderma*, 433, 116-454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116454>
- Annen, C., & Wagner, J.J., 2003. The Impact of Volcanic Eruptions During the 1990s. *Natural Hazards Reviews*, 4, 169-175. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:4\(169\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:4(169))
- Bachèlery, P. (2022). Understanding the geological history of volcanoes: An essential prerequisite to their monitoring. En A. J.F. Lénat (Ed), *Hazards and Monitoring of Volcanic Activity 1: Geological and Historic Approaches*, (pp. 1-74) John Wiley & Sons.
- Browne, B.L., & Gardner, J.E. (2004). The nature and timing of caldera collapse as indicated by accidental lithic fragments from the ~1000 A.D. eruption of Volcan Ceboruco, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130, 93-105. doi: [http://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00283-X](http://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00283-X)
- Burt, R. (2004). Soil survey laboratory methods manual. (R. N.42. V. 4.0). United States Department of Agriculture, Washington DC, USA.
- Castañeda, A., Darras, V., & Déodat, L. (2020). Assessing the prehispanic settlement of the Lerma Valley during the first millennium: Survey in the floodplain of Tres Mezquites, Michoacán, Mexico. *Journal of Anthropological Archaeology*, 58, 101-168. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jaa.2020.101168>
- Castillo-Reynoso, J., Ferrari, L., Silva-Fragoso, A., & Loza Aguirre, I.

- (2022). Digital geologic map, petrography and U-Pb geochronology of the Río Santiago Shear Zone, southernmost Sierra Madre Occidental, western Mexico. *Terra Digitalis*, 6, 1-11. doi: <http://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2022.1.96>
- Chédeville, C., Guilbaud, M.-N., & Siebe, C. (2020). Stratigraphy and radiocarbon ages of late-Holocene Las Derrumbadas rhyolitic domes and surrounding vents in the Serdán-Oriental basin (Mexico): Implications for archeology, biology, and hazard assessment. *The Holocene*, 30(3), 402-419. doi: <http://doi.org/10.1177/0959683619887417>
- Chevrel, M.O., Siebe, C., Guilbaud, M.-N., & Salinas, S. (2016). The AD 1250 El Metate shield volcano (Michoacán): Mexico's most voluminous Holocene eruption and its significance for archaeology and hazards. *The Holocene*, 23(3), 471-488. doi: <http://doi.org/10.1177/0959683615609757>
- Connor, C. (1987). Structure of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33(1-3), 191-200. doi: [http://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90061-8](http://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90061-8)
- Córdova, C., Martín del Pozzo, A.L., & Camacho, J.L. (1994). Palaeolandforms and volcanic impact on the environment of prehistoric Cuicuilco, Southern Mexico City. *Journal of Archaeological Science*, 21, 585-596. doi: <http://doi.org/10.1006/jasc.1994.1058>
- Courty, M. A. (2001). Microfacies Analysis Assisting Archaeological Stratigraphy. In: P. Goldberg, V. Holliday, & C. Ferring (Eds.), *Earth Sciences and Archaeology*. (pp. 205-239) Springer, Boston, MA. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1183-0_8
- Dahlgren, R. A., & Ugolini, F. C. (1990). The effects of tephra perturbations on soil processes in a tephritic Spodosol, Cascade Range, Washington. *Geoderma*, 45, 331-355. doi: [http://doi.org/10.1016/0016-7061\(89\)90015-3](http://doi.org/10.1016/0016-7061(89)90015-3)
- Darras, V. (2014). Proyecto Tres Mezquites. Vivir en la planicie aluvial del Lerma, Michoacán, Guanajuato, México. *Informe técnico sobre los trabajos de campo realizados en febrero y marzo de 2014 en la región de Tres Mezquites, Michoacán*. Archivo Técnico del Instituto Nacional de Antropología, México.
- Darras, V. (2021). The Petate and the Cosmic Order. Discoveries from a Grave in Michoacan, Mexico, during the Classic Period. *Ancient Mesoamerica*. Published online 07 June 2021. <https://doi.org/10.1017/S0956536121000067>
- Darras, V., Castañeda, A., Barrientos, I., & Lefebvre, K. (2017). Proyecto Tres Mezquites. Vivir en la planicie aluvial del Lerma, Michoacán, Guanajuato, México. *Informe técnico sobre los trabajos de campo realizados en 2017 en la región de Tres Mezquites, Michoacán*. Archivo Técnico del Instituto Nacional de Antropología, México.
- Darras, V., Castañeda, A., Déodat, L., Mireles, C., Barrientos, I., Medina-González, I., & Martínez-López, K. (2016). Proyecto Tres Mezquites. Vivir en la planicie aluvial del Lerma, Michoacán, Guanajuato, México. *Informe técnico sobre los trabajos de campo realizados en 2016 en la región de Tres Mezquites, Michoacán*. Archivo Técnico del Instituto Nacional de Antropología, México.
- Durkee, H., & Brown, F. (2014). Correlation of volcanic ash layers between the Early Pleistocene Acheulean sites of Isinya, Kariandusi, and Olorgesailie, Kenya. *Journal of Archaeological Science*, 49, 510-517. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.006>
- Espíndola, J.M., Mácias, J.L., Tilling, R.I. & Sheridan, M.F. (2000). Volcanic history of El Chichón Volcano (Chiapas, Mexico) during the Holocene, and its impact on human activity. *Bulletin of Volcanology*, 62, 90-104. doi: <https://doi.org/10.1007/s004459900064>
- Ferrari, L., López-Martínez M., & Rosas-Elguera J. (2002). Ignimbrite flare up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, 21(4), 17-1/24. doi: <http://doi.org/10.1029/2001TC001302>
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 343-378. doi: <http://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>
- Fisher, R.V., & Schmincke, H.U. (1984). Alteration of volcanic glass. In: *Pyroclastic Rocks*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6_12
- Gardner, J.E., & Tait, S., (2000). The caldera-forming eruption of Volcán Ceboruco, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 62, 20-33. doi: <http://doi.org/10.1007/s004450050288>
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-López, R., Israde-Alcántara, I., Rodríguez-Pascua, M.A., Szyrkark, E., Hernández-Madrigal, V.M., García-Zepeda, M.L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M. Medina-Vega, V.H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E., & Mora Chaparro, J. C. (2009). Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, Central Mexico. *Geofísica Internacional*, 48(3), 319-335. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2009.48.3.29>
- Gill, R., & Keating, J. (2002). Volcanism and Mesoamerican Archaeology. *Ancient Mesoamerica*, 13(1), 125-140. doi: <http://doi.org/10.1017/S0956536102131051>
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., & Ferrari, L., (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 227-283. doi: <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>
- González, S., Pastrana, A., Siebe, C., & Duller, G. (2000). Timing of the prehistoric eruption of Xitle Volcano and the abandonment of Cuicuilco Pyramid, Southern basin of Mexico. *Geological Society Special Publications*, 171, 205-224. doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.171.01.17>
- Gracheva, R.G., Targulian, V.O., & Zamotaev, I. (2001). Time-dependent factors of soil and weathering mantle diversity in the humid tropics and subtropics: a concept of soil self-development and denudation. *Quaternary International*, 78, 3-10. doi: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(00\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(00)00110-5)
- Grattan, J., & Torrence, R. (2016). *Living under the Shadow: Cultural Impacts of Volcanic Eruptions*. One World Archaeology. Routledge.
- Hasenaka, T., & Carmichael, I. (1987). The cinder cones of Micho-

- acan–Guanajuato, central México–petrology and chemistry. *Journal of Petrology*, 28, 241–269. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/28.2.241>
- Hasenaka, T., & Carmichael, I., (1985). The cinder cones of Michoacan–Guanajuato, Central México; their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105–124. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90007-1)
- Huffman, E. (1977). Performance of a new automatic carbon dioxide coulometer. *Microchemical Journal*, 22, 567–573.
- Inbar, M., Lugo-Hubp, J., & Villers-Ruiz, L., (1994). The geomorphological evolution of the Paricutin cone and lava flows, Mexico, 1943–1990. *Geomorphology*, 9, 57–76. doi: [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90031-0)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Teúl de González Ortega Zacatecas. México, INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Aspectos geográficos, Michoacán. México, INEGI.
- International Union of Soil Science. (2022). World Reference Base for Soil Resources. *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. (4 ed). International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
- Jiménez, P. (2020). The Mesoamerican World System, 200–1200 C.E. A Comparative Approach Analysis of West Mexico. Cambridge University Press.
- Jiménez, P., & Darling, A. (2000). Archaeology of Southern Zacatecas. The Malpaso, Juchipila, and Valparaiso-Bolaños Valleys. En M. Foster y S. Gorenstein (Eds.) *Greater Mesoamerica. The Archaeology of West and Northwest Mexico*. (pp. 155–180). The University of Utah Press.
- Johnson, C.A., & Harrison, C. (1990). Neotectonics in Central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(2–4), 187–210. doi: [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90037-X)
- Kshirsagar, P., Siebe, C., Guilbaud, M.N., & Salinas, S. (2015). Late Pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): Stratigraphy, tectonic setting, and paleo-hydrogeological environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 214–236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.003>
- Lanos, P., Chauvin, A., Darras, V., Pereira, G. (2018) *Del Preclásico al Posclásico Tardío en el centro-norte de Michoacán: nuevos datos de fechas por 14C y arqueomagnetismo*. [Sesión de conferencia]. Coloquio internacional Movilidades, Territorios y Cambios sociopolíticos en el Centro-Oeste de México. Ciudad de México.
- Larrea, P., Siebe, C., Juárez-Arriaga, E., Salinas, S., Ibarra, H., & Böhnel, H. (2019). The ~ AD 500–700 (Late Classic) El Astillero and El Pedregal volcanoes (Michoacán, Mexico): a new monogenetic cluster in the making? *Bulletin of Volcanology*, 81, 59. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1318-5>
- Leggo, P.J., Cochemé, J.J., Demant, A., & Lee, W.T. (2001). The role of argillic alteration in the zeolitization of volcanic glass. *Mineralogical Magazine*, 65 (5), 653–663. doi: <https://doi.org/10.1180/002646101317018479>
- Lilienfein, J., Qualls, R. G., Uselman, S. M., & Bridgham, S. D. (2003). Soil formation and organic matter accretion in a young andesitic chronosequence at Mt. Shasta, California. *Geoderma*, 116, 249–264. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)000867](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)000867)
- Lowe, J.J., Barton, N., Blockley, S.P.E., Bronk Ramsey, C., Cullen, V.L., Davies, W., Gamble, C., Grant, K., Hardiman, M., Housley, R., Lane, C.S., Lee, S., Lewis, M., MacLeod, A., Menzies, M., Müller, W., Pollard, M., Price, C., Roberts, A.P., Rohling, E.J., Satow, C., Smith, V.C., Stringer, C.B., Tomlinson, E.L., White, D., Albert, P., Arienzon, I., Barker, G., Boric, D., Carandente, A., Civette, L., Ferrier, C., Guadelli, J.-L., Karkanis, P., Koumouzelis, M., Müller, U.C., Orsi, G., Pross, J., Rosi, M., Shalamanov-Korobar, L., Sirakov, N., & Tzedakis, P.C. (2012). Volcanic ash layers illuminate the resilience of Neanderthals and early modern humans to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 13532–13537 doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1204579109>
- Macías, J.L. & Arce, J.L. (2019). Volcanic Activity in Mexico During the Holocene. En A. Torrescano-Valle, G. Islebe., P.Roy., (Eds), *The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico*. (pp. 129–170). Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-31719-5_8
- Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379–424.
- Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Saucedo, R. & Sánchez-Núñez, J.M. (2018). Late Formative flooding of Izapa after an eruption of Tacaná Volcano. *Ancient Mesoamerica*, 29, 361–371. doi: <http://10.1017/S095653611800010X>
- Mahgoub, A.N., Reyes-Guzmán, N., Böhnel, H., Siebe, C., Pereira, G., & Dorison, A. (2017). Paleomagnetic constraints on the ages of the Holocene Malpaís de Zacapu lava flow eruptions, Michoacán (México): Implications for archeology and volcanic hazards. *The Holocene*, 28(2), 229–245. doi: <https://doi.org/10.1177/0959683617721323>
- McHenry, L.H., Njau, J.K., de la Torre, I., & Pante, M.C. (2016). Geochemical “fingerprints” for Olduvai Gorge Bed II tuffs and implications for the Oldowan Acheulean transition. *Quaternary Research*, 85, 147–158.
- Moore, G., Marone, C., Carmichael, I., & Renne, P. (1994). Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 383–394. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1994\)106<0383:BVAENT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0383:BVAENT>2.3.CO;2)
- Nelson, S. (1980) Geology and petrology of Volcan Ceboruco, Nayarit, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 91, 2290–2431. doi: <https://doi.org/10.1130/GSAB-P2-91-2290>.
- Nieto-Obregón, J., Delgado-Argote, L., & Damon, P.E. (1981). *Relaciones petrológicas y geocronológicas del magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas*. (MT. 14). Asociación de Ingenieros Mineros, Metalurgistas y Geólogos de México.

- Nieto-Samaniego, Á.F., Ferrari, L., Alaniz-Álvarez, S.A., Labarthe Hernández, G., & Rosas-Elguera, J. (1999). Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 347-363. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0347:VOCEAV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0347:VOCEAV>2.3.CO;2)
- Pessina, V., Garcia, A., Meroni, F., Sandri, L., Selva, J., Azzaro, R., Bilotta, G., D'Amico, S., Viturra, M., Ongaro, T.E., Ganci, G., Mereu, L., Scollo, S., & Cappello, A. (2023). *From Multi-Hazard to Multi-Risk at Mount Etna: Approaches and Strategies of the PANACEA Project*. [Presentación de paper] Advances in Science, Technology and Innovation, Portugal. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25042-2_7
- Plunket, P., & Uruñuela, G. (2006). Social and cultural consequences of a late Holocene eruption of Popocatepetl in central Mexico. *Quaternary International*, 151, 19-28. doi: doi.org/10.1016/j.quaint.2006.01.012
- Pola, A., Macías, J.L., Osorio-Ocampo, S., Garduño-Monroy, V.H., Melchor, C.S Cardona, S.M. & Martínez-Martínez, J. (2014). Geological setting, volcanic stratigraphy, and flank failure of the El Estribo Volcano, Pátzcuaro (Michoacán, México). En A. Rocha., J. Pais., J. Kullberg., S. Finney, (Eds), *STRATI 2013*. (pp. 1251–1256). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-04364-7_240
- Ramírez-Urbe, I., Siebe, C., Salinas, S., Guilbaud, M.N., Layer, P., & Benowitz, J., (2019). 14C and 40Ar/39Ar radiometric dating and geologic setting of young lavas of Rancho Seco and Mazcuta volcanoes hosting archaeological sites at the margins of the Pátzcuaro and Zacapu lake basins (central Michoacán, Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 388, 1-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106674>
- Reyes-Guzmán, N., (2020). Reconstrucción de la historia eruptiva de los flujos de lava del Malpaís Zacapu (Michoacán): Reología, dinámica y tiempo de emplazamiento. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Chevrel, O.M. & Pereira, G., (2021). Late Holocene Malpaís de Zacapu (Michoacán, México) andesitic lava flows: rheology and eruption properties based on LiDAR image. *Bulletin of Volcanology*, 83, 28. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01449-0>
- Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Chevrel, O.M., Salinas, S., Guilbaud, M.N., & Layer, P. (2018). Geology and radiometric dating of Quaternary monogenetic volcanism in the western Zacapu lacustrine basin (Michoacán, México): Implications for archaeology and future hazard evaluations. *Bulletin of Volcanology*, 80(2), 18. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1193-5>
- Ruiz, P., Mana, S., Gutiérrez, A., Alarcón, G., Garro, J., & Soto, G., (2018). Geomorphological insights on human-volcano interactions and use of volcanic materials in pre-hispanic cultures of Costa Rica through the Holocene. *Frontiers in Earth Science*, 6, 13. doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00013>
- Scheubel, F.R., Clark, K.F., & Porter, E., (1988). Geology, tectonic environment, structural controls in the San Martin de Bolaños District, Jalisco. *Economic Geology*, 83, 1703-1720. doi: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.8.1703>
- Scolamacchia, T. & Capra, L. (2015) El Chichon Volcano: Eruptive History. En A. Scolamacchia., J.L. Macías. (Eds), *Active Volcanoes of Chiapas (Mexico): El Chichón and Tacaná. Active Volcanoes of the World*. (pp. 45-76). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-25890-9_3
- Sheets, P. (2019). Explosive volcanic eruptions and societal responses: A comparative archeological study in middle America. En A. Oliver-Smith, S. Hoffman, S.M. Hoffman (Eds). *The Angry Earth, Disaster in Anthropological Perspective*. (pp. 60-77). Routledge, London
- Shoji, S., M. Nanzyo., & R. Dahlgren. (1993). Genesis of volcanic ash soils. En A. Shoji, M. Nanzyo, & R. Dahlgren (Eds.). *Volcanic ash soils: Genesis, properties, and utilization*. (pp. 37-71). Developments in Soil Science. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70264-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70264-2)
- Siebe, C., & Macías, J.L. (2006). Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field. En A. Siebe., J.L. Macias, G. Aguirre-Diaz. (Eds.) *Neogene-Quaternary continental margin volcanism: a perspective from Mexico*. (pp.253-329) Geological Society of America. doi: <https://doi.org/10.1130/2004.VHITMC.PFG>
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., & Obenholzner, J. (1996). Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future? *Geology*, 24 (5), 399-402. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0399:RVDIPT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0399:RVDIPT>2.3.CO;2)
- Siebe, C., Guilbaud, M.-N., Salinas, S., & Layer, P. (2013). *Comparison of the volcanic geology of the Tacámbaro-Puruarán (arc front) and the Zacapu (arc inland) areas in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, México*. [Presentación de paper] IAVCEI 2013 Scientific Assembly, Kagoshima, Japan.
- Sieron, K. (2009). *Historia eruptiva, volúmenes emitidos y composición geoquímica e isotópica (sistemas Nd, Sr y Pb) del Volcán Ceboruco y edificios monogenéticos contiguos, Estado de Nayarit, México*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Sieron, K., & Siebe, C. (2008). Revised stratigraphy and eruption rates of Ceboruco volcano and surrounding monogenetic vents (Nayarit, Mexico) from historical documents and new radiocarbon dates. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 241-264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.04.006>
- Sieron, K., Ferres, D., Siebe, C., Capra, L., Constantinescu, R., Agustín-Flores, J., Gonzalez, Z. K.; Bohnel, H., Connor, L., Connor, B. C., & Groppelli, G. (2019a). Ceboruco hazard map: part I – Defenition of hazard scenarios based on the eruptive history. *Journal of Applied Volcanology*. 8:9, doi: <https://doi.org/10.1186/s13617-019-0088-2>
- Sieron, K., Ferres, D., Siebe, C., Constantinescu, R., Capra, L., Connor, C., Connor, L., Groppelli, G., & González Z. K. (2019b). Ceboruco hazard map: part I – Defenition of hazard scenarios based on the eruptive history. *Journal of Applied Volcanology*. 8:9, doi: <https://doi.org/10.1186/s13617-019-0088-2>

doi.org/10.1186/s13617-019-0088-2

- Solar, L. (2010). Los Complejos Funerarios Tempranos en el Centro y Sur de Zacatecas. En A. Solar (Ed), *El sistema fluvial Lerma-Santiago durante el Formativo y el Clásico Temprano: precisiones cronológicas y dinámicas culturales*. (pp. 217–242). Instituto Nacional De Antropología E Historia.
- Solar, L., & Padilla, A. (2013). Cerámicas diagnosticas del sur de Zacatecas durante el periodo de apogeo regional, con énfasis en los valles de Tlaltenango y Cañón de Juchipila. En A. Pomedio, G. Pereira & E. Fernández (Eds.). *Tradiciones cerámicas del Epiclásico en el Bajío y regiones aledañas: cronología e interacción* (pp. 189–202), BAR International Series.
- Solar, L., Jiménez, P., & Martínez, L. (2018). *Cerro del Teúl, Zacatecas. Arqueología: Diálogos con el Pasado*. Instituto Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México.
- Solar, L., Jiménez, P., Martínez, L., Pérez, E., Somerville, A., & Carrillo, M. (2014). *El Cerro del Teúl. Desarrollo histórico y contexto regional de un centro ceremonial de la gran caxcana*. (3a TP, Tercera Temporada). Arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México.
- Solar, L., Jiménez, P., Pérez, E., Martínez, L., Bañuelos, J., Quintero, B., & Carrillo, M. (2009). *El Cerro del Teúl. Desarrollo histórico y contexto regional de un centro ceremonial de la gran caxcana*. (1a. TP. Primera Temporada). Archivo Técnico de Arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México.
- Solar, L., Jiménez, P., Pérez, E., Martínez, L., Bañuelos, J., Quintero, B., & Carrillo, M. (2011). *El Cerro del Teúl. Desarrollo histórico y contexto regional de un centro ceremonial de la gran caxcana*. (2 a TP. Segunda Temporada). Archivo Técnico de Arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México.
- Solar, L., Martínez, L., & Jiménez, P. (2021) *La red Aztatlán tierra adentro (sur de Zacatecas)*. [Webposio]. <https://www.youtube.com/watch?v=Cg2O--CjhtY>.
- Solar, L., Nelson, B., & Ohnorsorgen, M. (2019). Aztatlán: Una red de interacción en el Occidente de México. En A. Solar, L., Nelson, B. (Eds.) *Aztatlán: Interacción y cambio social en el Occidente de México ca. 850-1350 d.C.* (pp. 1-38) El Colegio de Michoacán-Arizona State University.
- Solleiro-Rebolledo, E., Darras, V., Sedov, S., Vargas-Rodríguez, F., García-Zeferino, T., & Leonard, D. (2021). Black clayey soil (Vertisol) in the Lerma valley, Michoacán, North-Central Mexico: a hint to the environmental and cultural changes during the late Classic period? *Geoarchaeology*, 36, 854-874, doi: <https://doi.org/10.1002/gea.21879>
- Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Macías, J.L., & Pi T. (2007). Late Holocene paleopedological records contained in tephra from the Chichón volcano, Chiapas, Mexico. *Catena*, 71, 444-455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.03.012>
- Solleiro-Rebolledo, E., Straubinger, M., Terhorst, B., Sedov, S., Ibarra, G., Sánchez-Alaniz, J.I., Solanes, M.C., & Marmolejo, E. (2016). Paleosols beneath a lava flow in the southern basin of Mexico: the effect of heat on the paleopedological record. *Catena*, 137, 622–634. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.002>
- Soria-Caballero, D.C., Gómez-Calderón, D.A. & Garduño-Monroy, V.H. (2021). Análisis paleosísmico de la falla El Malpaso-El Salto, norte de Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(2), A181220. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a181220>
- Sosa-Ceballos, G., Boijseauneau-López, M.E., Pérez-Orozco, J.D., Cifuentes-Nava, G., Bólos, X., & Peron, M. (2021). Silicic magmas in the Michoacán-Guanajuato volcanic field: An overview of plumbing systems, crystal storage, and genetic processes. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38, 210–225. doi: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1668>
- Stoops, G. (2003). *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*, Soil Science Society of America.
- Takahashi, T., & Dahlgren, R.A. (2016). Nature, properties and function of Aluminium-humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, 263, 110-121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.032>.
- Tryon, C.A., Logan, M.A.V., Mouralis, D., Kuhn, S., Slimak, L., & Balkan-Atl, N. (2009). Building a tephrostratigraphic framework for the Paleolithic of central Anatolia, Turkey. *Journal of Archaeological Science*, 36, 637-652. doi: 10.1016/j.jas.2008.10.006
- Ugolini, F.C., & Dahlgren, R.A (2002). Soil development in volcanic ash. *Global Environmental Research*, 6, 69-81.
- Wada, K. (1985). The distinctive properties of Andosols. In A. Steward (Ed.), *Advances in Soil Science*, (pp. 173-229). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5088-3_4
- Walkley, A., & Black, L. A. (1934). An examination of a method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wolff-Boenisch, D., Gislason, S. R., Oelkers, E. H., & Putnis, C.V. (2004). The dissolution rates of natural glasses as a function of their composition at pH 4 and 10.6, and temperatures from 25 to 74°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 4843-4858. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.05.027>
- Zaragoza, G., Caballero-García, L., Capra, L. & Nieto-Torres, A. (2020). Lahares secundarios en el volcán Popocatepetl: El lahar Nexpayantla del 4 de febrero, 2010. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(2), 121-134. doi: <http://10.22201/cgeo.20072902e>