



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE ESTUCOS Y
MORTEROS DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE
TEOTIHUACÁN CON UNA PERSPECTIVA DE
RESTAURACIÓN Y PRESERVACIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

P R E S E N T A :

KARLA ANDREA GUILLÉN DOMÍNGUEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

Ciudad Universitaria, CDMX. 2018





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.

1. Datos del alumno.

Guillén
Domínguez
Karla Andrea
5528031266
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
311217270

2. Datos del tutor

Dra.
Solleiro
Rebolledo
Elizabeth

3. Datos del sinodal 1

Dra.
Ortega
Guerrero
Beatriz

4. Datos del sinodal 2

Mtra.
Alfaro
Martínez
Rosa Liliana

5. Datos del sinodal 3

Dr.
Sánchez
Pérez
Serafín

6. Datos del sinodal 4

Dr.
Cabadas
Báez
Héctor Víctor

7. Datos del trabajo escrito

Caracterización Geoquímica de estucos y morteros de la zona arqueológica de Teotihuacán
con una perspectiva de restauración y preservación

62 p.
2018

8. Palabras clave

Estucos y morteros
Suelos y paleosuelos
Teotihuacán
Restauración

Agradecimientos

A la UNAM por permitirme entrar en un mundo diferente, donde adquirí los conocimientos más valiosos a lo largo de mi vida estudiantil, necesarios para llegar al final de esta etapa.

Agradezco al proyecto Superpuestos a cargo de la Restauradora: Mtra. Rosa Liliana Alfaro Martínez, quien hizo posible el acceso a muestras originales de Zona de Monumentos Arqueológicos de Teotihuacán, para desarrollar el proyecto de investigación, así como los recursos para los análisis correspondientes y el apoyo económico brindado.

A mi tutora de tesis, la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, por tomarse el tiempo para las revisiones y sus consejos para realizar y ordenar la tesis.

A mis sinodales, Dra. Beatriz Ortega Guerrero, Mtra. Rosa Liliana Alfaro Martínez, Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Dr. Serafín Sánchez Pérez, Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez, por tomarse el tiempo de leer este texto y formar parte de mi jurado.

A los técnicos de laboratorio, M. en C. de la Tierra Jaime Díaz Ortega, del taller de laminación de suelos y materiales no consolidados, del laboratorio de Paleosuelos y al Biol. René Alcalá Martínez, del laboratorio de Física de suelos del Instituto de Geología, UNAM, quienes me ayudaron a realizar los análisis necesarios para este trabajo.

Al grupo de Paleosuelos, por guiarme en el desarrollo de la investigación, así como los conocimientos brindados por este maravilloso grupo multidisciplinario.

A los maestros de Licenciatura, de quienes obtuve los conocimientos más valiosos para desarrollarme intelectualmente e inculcarme el gusto por el estudio de este maravilloso mundo.

A mi familia, en especial a mi mamá, quien siempre hizo lo imposible por brindarme los recursos necesarios, para seguir estudiando, animándome a ver el lado positivo de las cosas, por sus consejos para el día a día y todo su amor.

A mi mejor amigo y compañero desde CCH, Armando, sin ti la Licenciatura hubiera sido mucho más difícil, gracias por ayudarme en los momentos más difíciles de mi carrera y personales, te estaré siempre agradecida, por todo el tiempo invertido en explicarme y toda la paciencia y amor que me tienes.

A mis amigos de la licenciatura, con los cuales fui creciendo intelectualmente, aprendiendo de ellos y apoyándonos en los momentos más difíciles durante la carrera, pero en especial a Edwin, Mario y Pepe que me apoyaron cuando inicio este proyecto de investigación.

A mis amigos Paola, Ariana, Sol, Bere, Silvia, Laura, Valeria, Sama, por todas las risas, el apoyo y que a pesar de ser tan diferentes me dieron ánimos y escucharon en todo momento son grandes personas los adoro.

ÍNDICE

Índice de figuras	6
Índice de cuadros y tablas	7
Resumen	8
Introducción	9
Capítulo 1 - Diseño experimental.....	10
1.1 Planteamiento del problema.....	10
1.2 Justificación.....	10
1.3 Hipótesis	10
1.4 Objetivos.....	11
Capítulo 2 Marco Teórico	12
2.1 Temporalidad de la cultura Teotihuacana.....	12
2.2 Estucos y morteros	13
2.2.1 Los estucos en la arqueología	13
2.3 Otros materiales empleados en la construcción de Teotihuacán.....	14
2.4 Otras técnicas aplicadas al estudio de estucos y morteros.....	15
Capítulo 3 Área de estudio.....	16
3.1 Localización del área de estudio.....	16
3.2 Geología del Valle de Teotihuacán.....	16
3.2.1 Carta geológico-Minera de la Ciudad de México.....	17
3.3 Clima	18
3.4 Vegetación.....	18
3.5 Suelos y Paleosuelos del Valle de Teotihuacán	19
Capítulo 4 Metodología	20
4.1 Reconocimiento y muestreo en campo.....	20
4.2 Caracterización Física.....	25
4.2.1 Micromorfología de lámina delgada y porosidad.....	25
4.2.2 Análisis de Textura o granulometría	27
4.3 Caracterización Química.....	28
4.3.1 pH	28
4.3.2 Conductividad eléctrica	28
4.3.3 Susceptibilidad Magnética.....	29

Capítulo 5 Resultados	30
5.1 <i>Caracterización micromorfológica de los materiales.....</i>	30
5.1.1 <i>Micromorfología de materiales naturales</i>	30
5.1.2 <i>Micromorfología de materiales arqueológicos parte 1</i>	39
5.1.3 <i>Micromorfología de materiales arqueológicos parte 2</i>	44
5.2 <i>Caracterización física de textura.....</i>	50
5.3 <i>Caracterización química de los materiales</i>	52
5.3.1 <i>pH y conductividad eléctrica</i>	52
5.3.2 <i>Susceptibilidad Magnética.....</i>	53
Capítulo 6 Discusión de los Resultados.....	54
6.1 <i>Propiedades físicas y químicas</i>	54
6.2 <i>Micromorfología</i>	54
6.3 <i>Técnicas constructivas.....</i>	55
6.4 <i>Consideraciones para la restauración de la ZMAT</i>	56
Conclusión.....	58
Bibliografía	59

Índice de figuras

Número de figura	Descripción	Página
1	Vista panorámica de la ZMAT.	10
2	Ubicación geográfica de la ZMAT.	16
3	Porción de la Carta E14-2, donde se observa la geología del valle de Teotihuacán y sus alrededores.	17
4	Climograma del Valle de Teotihuacán.	18
5	Perfil Topográfico de un transecto N-S en el valle de Teotihuacán. En el que se presenta la morfología de los perfiles, así como la reconstrucción de los paleosuelos.	19
6	Ubicación del área de estudio, así como los puntos elegidos para el muestreo de campo.	20
7	Ubicación de las muestras arqueológicas, dentro de la ZMAT.	24
8	Etapas constructivas en Teotihuacán.	24
9	Determinación de textura por método de la pipeta.	27
10	pH-metro y conductímetro, <i>Thermo Scientific</i> .	28
11	Medición de la Susceptibilidad, Laboratorio de Paleomagnetismo.	29
12	Susceptibilímetro marca <i>Barrington MS2</i> .	29
13	Lámina delgada del depósito de caída 1.	30
14	Lámina delgada del depósito de caída 2.	30
15	Fotomicrografías de los depósitos volcánicos muestras 1 y 2.	31
16	Lámina delgada del horizonte 3A- R.S.P.	32
17	Fotomicrografías del horizonte 3A- Rio San Pablo.	32
18	Lámina delgada del horizonte 5ABti R.S.P.	33
19	Fotomicrografías del horizonte 5ABti R.S.P.	34
20	Lámina de la muestra 5Bti R.S.P.	35
21	Fotomicrografías del horizonte 5Bti RSP.	35
22	Lámina delgada del horizonte 2Bt C.G.	36
23	Fotomicrografías del horizonte 2Bt-Cerro Gordo.	36
24	Lámina delgada del horizonte 3Bt C.G.	37
25	Fotomicrografías del horizonte 3Bt-Cerro Gordo.	37
26	Lámina delgada del horizonte 4Ct -C.G.	38
27	Fotomicrografías del horizonte 4Ct-Cerro Gordo.	38
28	Lámina delgada de la muestra 9K, Muestra Conjunto NE, Rio San Juan.	39
29	Lámina delgada de la muestra 11K, Superpuesto Exterior 2da Etapa.	39
30	Lámina delgada de la muestra 12K, Ciudadela Nte.	39
31	Lámina delgada de la muestra 14K, Conjunto Plaza Este.	39
32	Lámina delgada muestra 15K, Plaza del Sol.	40
33	Fotomicrografías de las muestras con predominancia volcánica, parte 1.	41

34	Fotomicrografías de las muestras con predominancia volcánica, parte 2.	42
35	Lámina delgada de la muestra Plaza Luna (10K).	44
36	Lámina delgada de la muestra Zacuala 13K.	44
37	Lámina delgada de la muestra estuco teotihuacano (16K).	44
38	Fotomicrografías de las muestras con estuco, parte 1.	46
39	Fotomicrografías de las muestras con estuco (LR), parte 2.	47
40	Fotomicrografías de las muestras con estuco, parte 3, mortero.	49
41	Textura de horizontes de paleosuelos seleccionados, R.S.P.	50
42	Textura de horizontes de paleosuelos seleccionados, C.G.	50
43	Textura de las muestras arqueológicas, ZMAT.	51
44	Gráfico de pH, muestras arqueológicas, ZMAT.	52
45	Gráfico de CE de muestras arqueológicas, ZMAT.	52

Índice de cuadros

Número de cuadro	Descripción	Página
1	Descripción del Perfil Cerro Gordo.	21
2	Descripción del Perfil Rio San Pablo.	22
3	Descripción del depósito volcánico, faldas del Cerro Gordo.	23

Índice de tablas

Número de tabla	Descripción	Página
1	Láminas realizadas, para el estudio micromorfológico.	25
2	Valores de pH y CE de las muestras naturales.	52
3	Valores normalizados de susceptibilidad magnética.	53

Resumen

En la presente investigación, se realizó una caracterización físico-química de 16 muestras, 8 de ellas pertenecientes a muestras originales de estucos y morteros de la Zona de Monumentos Arqueológicos de Teotihuacán (ZMAT) y 8 de materiales geológicos: suelos, paleosuelos y depósitos volcánicos de los alrededores del valle de Teotihuacán.

El objetivo fue determinar la composición físico-química, así como la caracterización micro y macro morfológica que permitieran localizar las fuentes de materiales que fueron usados en manufactura de los estucos y morteros. Este estudio nació de la necesidad de llevar a cabo una restauración más eficiente del Patrimonio arquitectónico de la ZMAT con materiales similares a los usados durante su construcción o manufactura. Para hacer esto posible, se realizó un análisis visual, micromorfológico, químico e histórico de la ZMAT y sus alrededores, lo cual permitió dar una aproximación de los principales componentes que se utilizaron para la elaboración de los estucos y morteros.

La metodología empleada consistió en hacer un recorrido de campo, colectando muestras de materiales pedológicos y geológicos en los alrededores de la ZMAT, mismos que ya habían sido identificados en trabajos previos por Rivera *et al.* (2007) y Sánchez (2015) entre otros mencionados con detalle en la bibliografía.

Los análisis efectuados fueron textura, pH, conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética y micromorfología. Dichas técnicas permitieron conformar un panorama general de las características generales que tienen las muestras arqueológicas y las naturales, definiéndose claramente las posibles fuentes.

De acuerdo con los resultados, se encontró que las muestras arqueológicas fueron elaboradas con materiales de origen volcánico, similares a los encontradas en el Cerro Gordo. Asimismo, se usaron restos del Paleosuelo Negro San Pablo (**PNSP**) presente en el valle de Teotihuacán y paleosuelos arcillosos que también se encuentran en el Cerro Gordo y la Sierra de Patlachique.

Por lo tanto, se puede concluir que los mejores resultados se obtuvieron por la caracterización micromorfológica, los cuales pueden ser usados para una posible restauración y evitar el deterioro de la ZMAT.

Introducción

En la arqueología, el determinar el tipo y procedencia de los materiales usados en diversos materiales, desde edificios hasta cerámica, es una constante. Existen variadas técnicas que tienen por objeto conocer la composición de estucos y morteros aplicados a la arqueología, desde las tradicionales que se basan en análisis químicos (Barba *et al.*, 1966) hasta técnicas más complejas como fechamientos o catodoluminiscencia (Murakami *et al.*, 2013) y petrografía (Straulino *et al.*, 2013).

Muchos de los trabajos arqueológicos en Teotihuacán están dirigidos a comprender las áreas de actividad, con apoyo de técnicas químicas que delimitan las zonas de descanso, de preparación y consumo de alimento, de disposición de residuos o de tránsito (Manzanilla, 2004). Recientemente, se ha hecho investigación más detallada en la caracterización de la cal empleada para la preparación de los acabados decorativos de estructuras arquitectónicas, tales como estucos (Murakami *et al.* 2013).

Un problema importante en la Zona de Monumentos Arqueológicos de Teotihuacán (ZMAT) es el constante deterioro que sufren los materiales por los factores de intemperismo, lo que ha provocado pérdida de los materiales originales, la cual exige realizar constantes restauraciones en la ZMAT. En muchas ocasiones, se ejecutan con materiales que no son exactamente los mismos que los pobladores de Teotihuacán utilizaban para su construcción. Desde el punto de vista de la restauración de los materiales arqueológicos, se requiere tener conocimiento de los materiales usados en la construcción, de manera que se “restaure con evidencias” (Schávelzon, 2017).

Por lo tanto, realizar una adecuada caracterización de los materiales originales es fundamental para tener una mejor selección de los materiales utilizados para la restauración de los monumentos que se hayan deteriorado.

De esta manera lo que se busca con este proyecto de investigación es identificar posibles fuentes naturales, que sirvan como materiales de construcción para una posible restauración de la ZMAT. Caracterizando materiales naturales como suelos y sedimentos y comparándolos con materiales arqueológicos, como estucos y morteros.

La investigación fue posible gracias a la participación de la Mtra. Rosa Liliana Alfaro Martínez, encargada del Departamento de Restauración de la ZMAT, quien brindó muestras originales de los estucos, morteros y que fueron autorizadas por el Director de la ZMAT, Arqueólogo Alejandro Sarabia González. Además del grupo de Paleosuelos del Instituto de Geología, quienes me ofrecieron las herramientas y observaciones necesarias, para realizar los análisis correspondientes a las muestras.

Capítulo 1 Diseño experimental

1.1 Planteamiento del problema

Los procesos naturales como, intemperismo y erosión en el valle de Teotihuacán, se manifiestan en diversas posiciones en el relieve sin discriminar, lo cual ha provocado un deterioro en uno de los rasgos más sobresalientes de dicho valle, la ZMAT. Esta contiene un gran valor histórico y cultural que ha provocado realizar constantes restauraciones en diversas estructuras arquitectónicas, para evitar su pérdida. Sin embargo, dichas restauraciones no se han ejecutado con los materiales exactos con los que se fabricó esta ciudad.

1.2 Justificación

La ZMAT, contiene vestigios de unas de las ciudades arqueológicas más importantes, y constituye logros arquitectónicos y urbanísticos de valor excepcional universal, que guarda un valor cultural para México y el mundo¹ DOF (como se citó en Alfaro-Martínez, 2015). De esta manera, identificar la procedencia de la materia prima con la cual se realizó la construcción de la ZMAT, es de vital importancia para su preservación y restauración.



Fig.1 Vista panorámica de la ZMAT.

1.3 Hipótesis

Se considera que los materiales usados para la construcción de la ZMAT, son derivados principalmente de fuentes locales, como suelos y sedimentos volcánicos del valle de Teotihuacán, tal como lo marcan los trabajos de McClung y Barba (2011), Rivera *et al.* (2007) y Sánchez *et al.* (2013). Esto se debe a que la obtención de dichos materiales, resultaría más sencilla y eficiente para sus antiguos pobladores. Sin embargo, también se utilizaron materiales de fuentes lejanas como para la producción de la cal (Barba, 1995).

Es por ello que se plantea que los materiales que se usaron para la elaboración de estucos y morteros provienen también de fuentes locales, los cuales pueden ser detectados por sus firmas geoquímicas, mineralógicas y por sus características micromorfológicas.

¹ DECRETO por el que se declara zona de monumentos arqueológicos el área conocida como Teotihuacán, Diario Oficial de la Federación, 30 de noviembre de 1988.

1.4 Objetivos

Objetivo general

- Identificar posibles fuentes de materiales para la elaboración de morteros y estucos que permitan desarrollar alternativas de restauración en la ZMAT, a través de la caracterización físico-químicas de los materiales.

Objetivos particulares

- Determinar los porcentajes relativos de la mineralogía de cada uno de los morteros y los estucos, a partir del análisis micromorfológico.
- Obtener la mineralogía de las muestras de suelo, depósitos volcánicos y arqueológicas.
- Identificar los principales aglutinantes con los que se elaboraron los estucos y morteros, que permita establecer alternativas de restauración y conservación de los materiales.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Temporalidad de la cultura Teotihuacana

La cultura teotihuacana floreció durante el periodo Clásico, entre los siglos I y VII dC, logrando una extensión de alrededor de 20 km². Actualmente, Teotihuacán se conoce como el lugar donde los hombres se convierten en dioses o ciudad de los dioses, es el nombre que se da a la que fue una de las mayores ciudades prehispánicas de Mesoamérica, la cual alcanzó una población de más de 125,000 habitantes. Sin embargo, originalmente el nombre de esta civilización hasta hoy en día no se conoce, y el nombre de Teotihuacán fue dado por los Mexicas cuando observaron por primera vez las ruinas gloriosas de esta ciudad (Millon, 1973).

La cantidad de gente que vivió en Teotihuacán en una extensión tan vasta requirió del consumo de grandes cantidades de energía: para la extracción, concentración y transformación de materiales, tales como: madera, utilizada como combustible en todos los procesos de transformación; alimentos, para mantener su población; piedra y cal, usadas como materiales constructivos (Barba, 2005).

De acuerdo con los trabajos de Barba (1995), se sugirió que la construcción de la ciudad requirió de la extracción de grandes cantidades de suelo. En estimaciones generales, se señaló que aproximadamente serían necesarios 5 km² para el relleno estructural de las pirámides dentro de la zona arqueológica. Rivera *et al.* (2007) mostraron que, en el interior de la Pirámide de la Luna, se usó un suelo de color negro y tepetate de los alrededores, para rellenar y nivelar los taludes de la estructura. Por otra parte, McClung y Barba (2011), estimaron que al menos 1,760,000 m³ de suelo agrícola fue tomado de los alrededores. Además del suelo, estos autores consideraron que se extrajo alrededor de 30,300 m³ de escoria volcánica.

Otro de los insumos que se utilizó intensivamente fue la cal, para los estucados de las diferentes superficies. Esta cal se produjo usando calizas Barba y Córdova (1999), posiblemente de Tula (Barba, 1995).

2.2 Estucos y morteros

El término estuco es usado ampliamente en la arqueología mesoamericana, por lo que diversos autores como Villaseñor y Aimers (2009) definen el término estuco, como materiales de cal para la arquitectura.

La base para la elaboración del estuco es la cal, que se obtiene por calcinación de rocas o sedimentos carbonatados (calizas, conchas, corales). El procedimiento requiere de la quema a una temperatura de aproximadamente 900°C, mediante la cual se obtiene óxido de calcio (CaO) –cal viva. Al agregar agua, se produce un hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) que genera la cal apagada. A este producto se agrega arena o caliza molida para formar una pasta Villaseñor y Aimers (2009) y Murakami *et al.*, (2013). Cuando el material se fragua, reacciona con el CO₂ atmosférico y recristaliza a carbonato de calcio. Es por ello que se considera que el estuco es una especie de caliza sintética (Villaseñor y Aimers, 2009).

En ocasiones, la adición de un agregado es necesaria para reducir la formación de grietas en el secado e impartir dureza y resistencia, lo que facilitará su endurecimiento (Elert *et al.*, 2002).

Por lo tanto, el mortero es una mezcla artificial de diversos materiales que se usan en la construcción, que tiene, sobretodo, una función estructural, o de acabado decorativo. Su uso es ampliamente reconocido en la arquitectura de diferentes partes del mundo y se considera que los materiales de los que está hecho proceden directamente del entorno (Rodríguez, 2005).

2.2.1 Los estucos en la arqueología

El estuco es un material que se ha usado en muchas culturas a nivel mundial. En Egipto, se presentan estructuras de diversas formas y tamaños que están cubiertas de cal y pintados (Dasen 1993). En el Medio Oriente, en el periodo antiguo tardío, el uso del estuco es muy popular; evidencias de dicho uso se encuentran en el imperio Sasaniano en la región de Mesopotamia a China, en los siglos 3 a 7 dC (Agnieszka, 2016). Son comunes las referencias a las paredes estucadas encontradas en excavaciones en Sumarra, localizada a 130 km al norte de Bagdad, Irak (Al-Janabi, 1983). En el oeste de la isla de Java, también se han recuperado fragmentos de muros y pisos con estuco, fechados en el siglo 5 dC (Manguin y Indrajaya, 2006).

En Mesoamérica, la utilización de la cal como fuente del estuco ha sido ampliamente documentado, sobre todo en la zona maya. En Yucatán, por ejemplo, la abundancia de caliza favorece la preparación de la cal. Sin embargo, se sabe que su uso diferencialmente, de acuerdo al nivel socio-económico, por ejemplo, las estructuras monumentales completamente encaladas contra las casas de uso doméstico con solo lechadas de cal (Villaseñor y Aimers, 2009). Pero el uso de la cal no se restringe a Yucatán, sino que puede ser trazado, a partir del periodo Pre-Clásico temprano (hace alrededor de 3000 años) en el norte de Guatemala y Belice (Barba y Villaseñor, 2013). De hecho, uno de los estucos más antiguos de la zona maya corresponde a las plataformas del sitio El Cuello en Belice, que data de 1100-600 aC (Hammond *et al.*, 1991).

En San José Mogote, Oaxaca, se tienen evidencias de pisos aplanados con cal sobre plataformas de tobas volcánicas, de edades entre 1400-1500 aC, mientras que en Chalcatzingo, Morelos, se han encontrado acumulaciones de cal quemada y calizas fragmentadas que se asocian a sitios de preparación (Barba y Córdova, 1999).

En el Altiplano mexicano, Teotihuacán es quizá la primera ciudad en la que se hace un uso intensivo de la cal (Barba y Córdova, 1999), a pesar de no contar con calizas en las cercanías directas a la cuenca de México. De hecho, en Cuicuilco, localizado al sur de la cuenca, los aplanados de las estructuras son de lodo (López, 1991). Se tiene referencias previas a Teotihuacán del uso de cal en pisos de estuco, en Tlapacoya (Barba de Piña Chán, 1980).

La cantidad de cal que se requirió para la gran cantidad de aplanados de Teotihuacán se estima en 5.5×10^5 ton de caliza y 12,200,000 ton de madera para la quema (Barba y Córdova, 1999). Dichas estimaciones están basadas en el número de edificaciones que se han registrado.

2.3 Otros materiales empleados en la construcción de Teotihuacán

Como se ha mencionado, además de la cal, se ha establecido que, para las estructuras teotihuacanas, se usaron suelos agrícolas y escorias (McClung y Barba, 2011).

El suelo que se ha observado en dichas construcciones, es de color negro, en el que se tienen restos de carbón y canales hechos por la fauna del suelo (Rivera *et al.*, 2007). Al buscar evidencias de la existencia de este suelo negro en la superficie de Teotihuacán, no se encuentran análogos inmediatos. Sin embargo, Sánchez *et al.* (2013), documentaron la existencia del Paleosuelo Negro en el valle de Teotihuacán y toman como perfil tipo San Pablo (PNSP) que representa la superficie de suelo que estaba presente en el momento de la ocupación en Teotihuacán. Es así como el suelo, como un recurso de su ambiente, juega un papel importante en el desarrollo y esplendor de la ciudad, particularmente en el periodo Clásico (200 – 650 dC) (Sánchez, 2015).

El PNSP o suelo teotihuacano es de color negro, con estructura en bloques angulares, compacta y de consistencia firme, arcilloso, que se encuentra sepultado o en superficie (Sánchez *et al.*, 2013). Este paleosuelo tiene evidencias de su uso en la agricultura, de acuerdo con la presencia de fragmentos de carbón que evidencian la quema de materia orgánica, fragmentos de agrocitanes, fitolitos de maíz, y rasgos que están relacionados al riego (Rivera *et al.*, 2007 y Sánchez *et al.*, 2013). Es por ello que en las estructuras teotihuacanas es fácil reconocer su extracción y uso.

2.4 Otras técnicas aplicadas al estudio de estucos y morteros

La metodología de preparación de la cal ya ha sido mencionada previamente. Varios estudios se han enfocado en identificar el tipo de materiales empleados en su preparación (Murakami *et al.*, 2013), en tanto que otros se han centrado en la metodología, por ejemplo, Villaseñor y Aimers, (2009).

Las técnicas empleadas en la identificación de los materiales comprenden:

- Análisis químicos por medio de fluorescencia de rayos X, que tienen como objetivo documentar el contenido elemental de las muestras (Villaseñor y Aimers, 2009).
- Estudios petrográficos que pretenden documentar la morfología y características de los estucos (Villaseñor y Aimers, 2009 y Murakami *et al.*, 2013), pero también identificar en grado de alteración de los materiales por efecto de intemperismo (Straulino *et al.*, 2013).
- Estudios de catodoluminiscencia que permite estudiar las diferentes fases de carbonatos en el estuco (Murakami *et al.*, 2013).
- Estudios isotópicos del estuco para fechamiento (^{14}C) y, recientemente para estudios de isótopos estables de carbón, que permiten dar fechas absolutas para materiales hechos a base de cal (Murakami *et al.*, 2013).
- Estudios de arqueomagnetismo que permiten dar un registro del campo magnético de la Tierra al momento de la elaboración de estucos calcinados y no calcinados, debido a la magnetización remanente de minerales ricos en hierro (Hueda *et.al.*, 2004). Los cuales se incorporan a mezclas de estucos y son abundantes principalmente en sitios arqueológicos de Mesoamérica (Soler *et al.*, 2006).

Capítulo 3 Área de estudio

3.1 Localización del área de estudio

La Zona de Monumentos Arqueológicos de Teotihuacán (ZMAT), se halla dentro de los municipios de San Juan Teotihuacán y San Martín de las Pirámides en el estado de México, a ~50km al Noreste de la Ciudad de México, en el Valle de Teotihuacán, el cual geográficamente, se encuentra en el centro de México, en la porción nororiental de la Cuenca de México, a una altitud que varía entre 2205 y 3050 m (Fig. 2).



Fig. 2 Ubicación geográfica de la ZMAT, tomado de (Alfaro, 2015).

3.2 Geología del Valle de Teotihuacán

Dicho Valle, está conformado por una planicie aluvial constituida principalmente por materiales aluviales y laháricos, con una pendiente de 0-4° (Tapia y López, 2001). Rodeando a esta planicie se encuentran sierras volcánicas, en las que destaca al norte, el Cerro Gordo con la posición más elevada, al oeste el Cerro Chiconautla, al sur la Sierra Patlachique y pequeños conos de escoria volcánicos como el Cerro San Lucas entre otros (Fig.3) (Rivera *et al.*, 2007).

Geológicamente los cerros más antiguos del valle de Teotihuacán corresponden al cerro Malinalco, con rocas tipo andesitas que pertenecen al Mioceno tardío y medio (Vazquez y Jaimes, 1989). La sierra de Patlachique, tiene una antigüedad del Plioceno temprano, compuesto por rocas andesitas y dacitas. El Cerro Gordo pertenece al Plioceno tardío y es considerado un estrato-volcán, con rocas tipo andesítico-basáltico (García *et al.*, 2002).

3.2.1 Carta Geológico-Minera de la Ciudad de México (E14-2). Edo. De México, Tlaxcala, DF, Puebla, Hidalgo y Morelos, escala 1:250 000, tomado del Servicio Geológico Mexicano (2002).

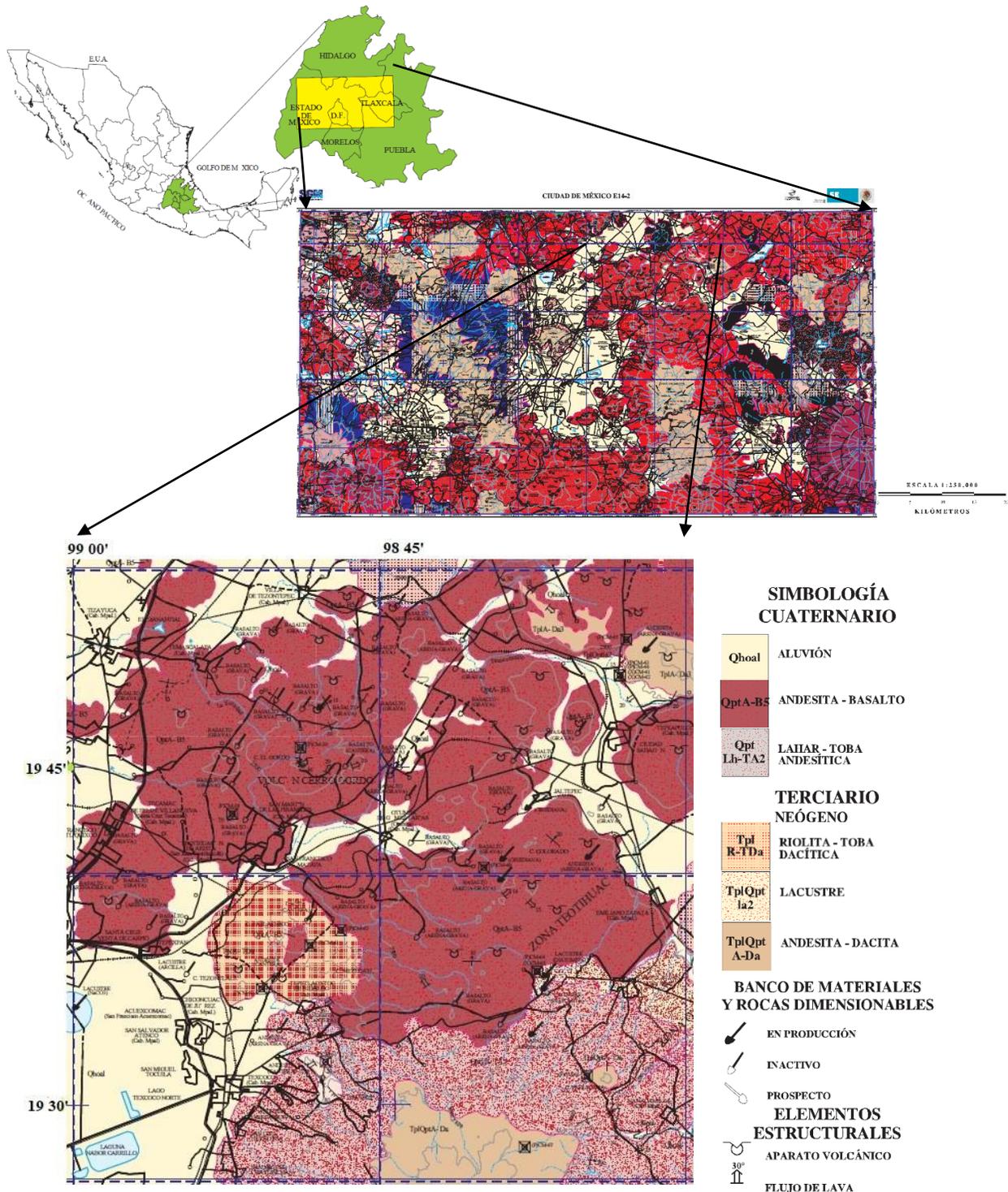


Fig.3 Porción de la Carta E14-2, donde se observa la geología del valle de Teotihuacán y sus alrededores, disponible para más detalles en: http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/89_E14-2_GM.pdf

Los conos cineríticos que conforman la mayoría de los volcanes dentro del valle, son más recientes, formados durante el Cuaternario, de composiciones variadas desde andesíticas hasta basálticas.

La mayoría de estos volcanes están alineados y emplazados a lo largo de un sistema de fallas normales con dirección NE-SW y una segunda alineación que se observa al NW, con dirección NW-SE (Hernandez, 2007).

Hidrográficamente el valle de Teotihuacán está conformado por cuatro ríos principales que son el Muerto, el Soldado y Piedras Negras que se unen en la planicie para formar al Rio San Juan, el cual fue modificado antiguamente para que su cauce pasara por la Ciudadela (Hernandez, 2007).

3.3 Clima

El clima es templado semiseco dentro de la zona arqueológica y subhúmedo templado en las elevaciones que la rodean. En general el valle tiene una temperatura media anual que varía entre los 12 y 15°C (Fig. 4). Teotihuacán muestra un paisaje árido y erosionado, con vegetación escasa y un suelo muy pobre (García, 1968), sin embargo, en la época prehispánica estaba situado a 13 km hacia el NO del lago de Texcoco por lo que su vegetación inherente tanto lacustre como ribereña contribuían a facilitar y regularizar la precipitación pluvial Gamio (como se citó en Alfaro, 2015). Por otra parte, Sánchez *et al.* (2013) consideran que el clima durante la época de ocupación teotihuacana era similar al de hoy en día, dadas las propiedades que presentan los suelos, particularmente los indicadores de la paleovegetación (Lounejeva *et al.*, 2006)

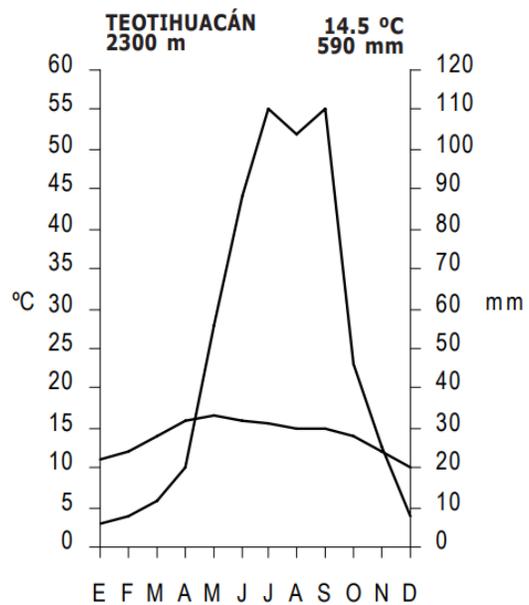


Fig. 4 Climograma del Valle de Teotihuacán, tomado de Rzedowski *et al.* (2010), p.18.

3.4 Vegetación

Se han registrado cambios en la vegetación de acuerdo a la altitud (Rzedowski *et al.*, 2010). En las partes bajas domina el matorral xerófilo, mientras que en las zonas más altas de las elevaciones que circundan al valle, se encuentran bosques de encino, en específico, en la ladera Norte del Cerro Gordo. Sin embargo, la vegetación actual, se ha visto alterada debido a la actividad humana, con presencia de cultivos agrícolas como el nopal (Solleiro *et al.*, 2010).

3.5 Suelos y paleosuelos del Valle de Teotihuacán

En el valle de Teotihuacán, se han clasificado los siguientes tipos de suelos: Fluvisoles, Feozems, Cambisoles, Leptosoles y Vertisoles (McClung *et al.*, 2003), aunque también se han identificado Calcisoles, sobre todo en las laderas de los cerros cercanos (Gama *et al.*, 2005).

Con respecto a los paleosuelos de la zona, se ha identificado una mayor variabilidad, entre los que destacan Luvisoles (suelos arcillosos) que se formaron en el Pleistoceno e inicios del Holoceno (Solleiro *et al.*, 2006). Para el periodo de ocupación teotihuacana, se ha identificado un paleosuelo de color negro, denominado el Paleosuelo Negro San Pablo (**PNSP**), el cual es arcilloso, con estructura en bloques angulares muy duros y el cual se puede encontrar en diferentes posiciones del relieve (Fig.5) (Solleiro *et al.* 2015).

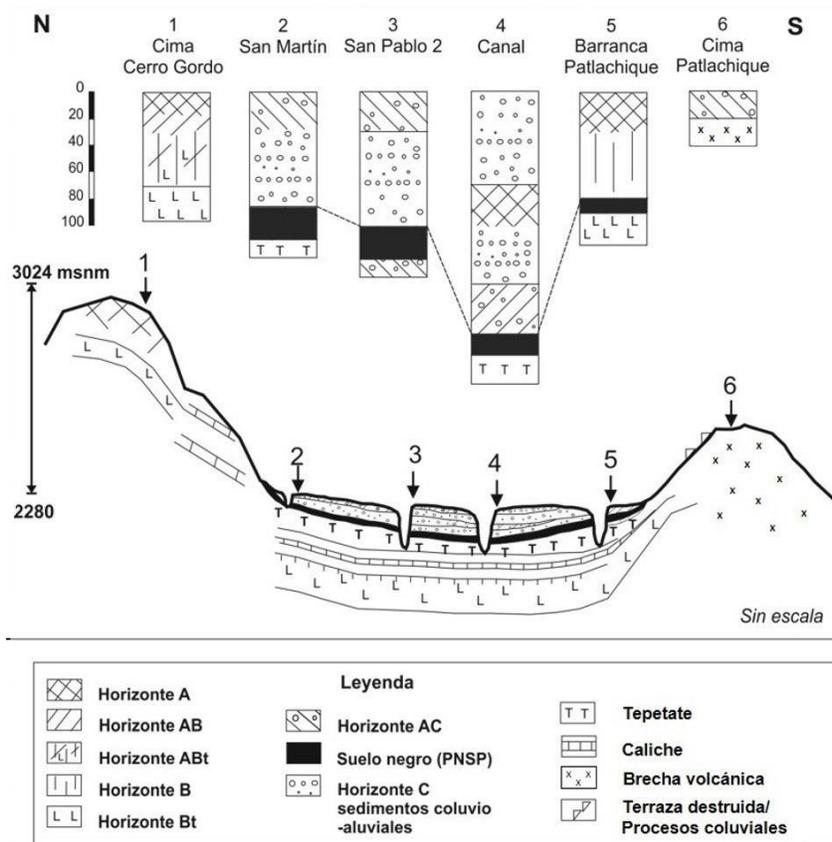


Fig.5 Perfil Topográfico de un transecto N-S en el valle de Teotihuacán. En el que se presenta la morfología de diferentes perfiles de suelo, así como la reconstrucción de los paleosuelos, tomado de Solleiro *et al.* (2015).

Capítulo 4 Metodología

4.1 Reconocimiento y muestreo en campo

Para la selección de los perfiles, se realizó un recorrido de campo de dos días, durante el mes de mayo 2017 al Estado de México, donde se visitaron 3 puntos circundantes a la ZMAT (Fig.), los cuales, se eligieron tomando en cuenta su posición en el relieve, de tal manera que dichos perfiles contrastaran (Fig.5). Su descripción se realizó gracias a la información generada por Solleiro *et al.* (2006); Rivera *et al.*, (2007); Valera (2016) y Sánchez (2015). Lo que permitió muestrear distintos horizontes, tomando en cuenta cambios en la estructura, textura al tacto y color.

Las localidades se describen a continuación.

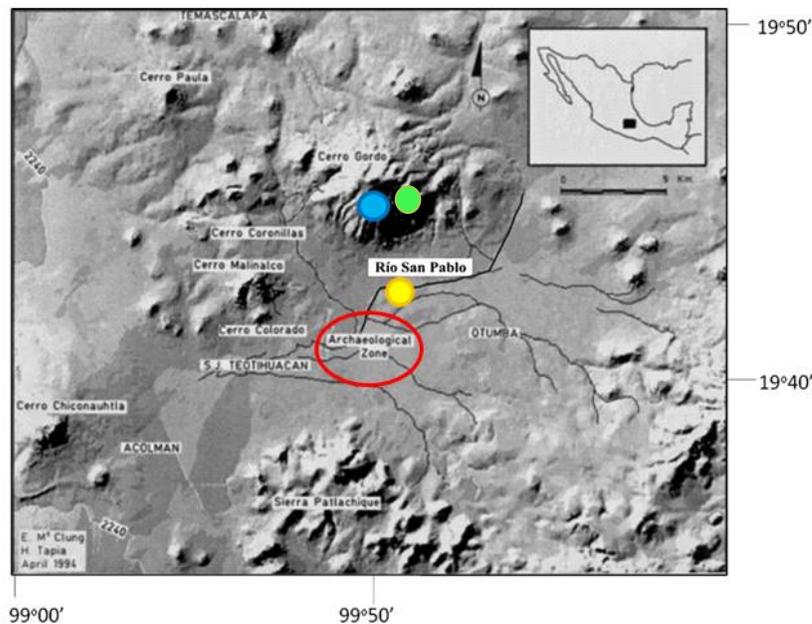
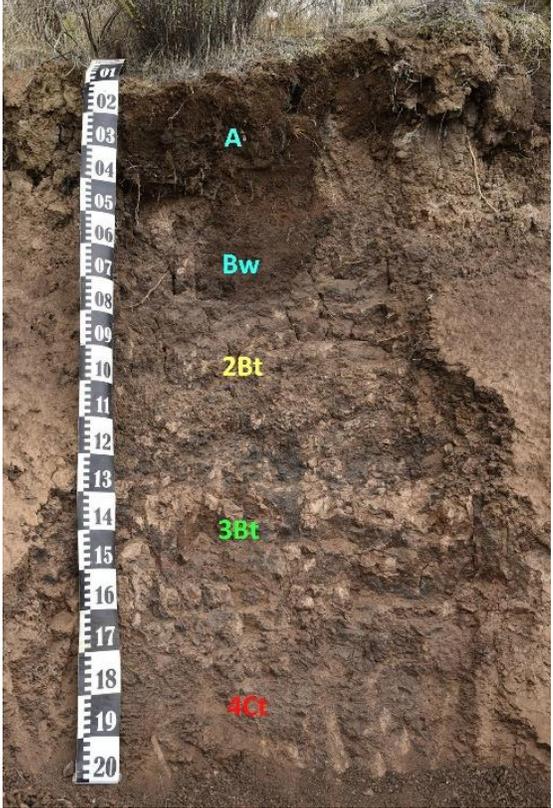


Fig. 6 Ubicación del área de estudio, así como los puntos elegidos para el muestreo de campo, tomado y modificado de Solleiro *et al.* (2010).

a) Perfil Cerro Gordo

En primer lugar, se encuentra el perfil Cerro Gordo (Fig. 6, marca azul) el cual se encuentra en la cima del estratovolcán a una altura de 2945msnm y es un perfil análogo al analizado previamente por Solleiro *et al.* (2015) y Valera (2016). Con coordenadas 19°45'16.3''N; 98°49'31.97''W. En este lugar aún se conserva el bosque de encino, aunque solo en porciones aisladas. El suelo presenta un perfil policíclico, constituido por horizontes A, Bw, 2Bt, 3Bt y 4Ct con un espesor de más de 2 metros (Valera, 2016, p.46) de los cuales, para este trabajo se tomaron muestras de los horizontes: **2Bt**, **3Bt**, **4Ct**, los cuales se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción del Perfil Cerro Gordo, tomado y modificado de Valera (2016).

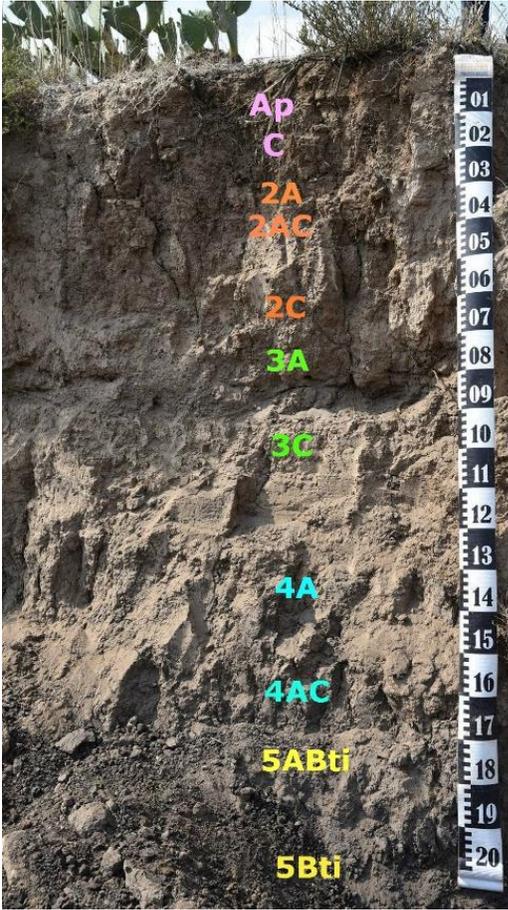
Perfil Cerro Gordo	Características generales
	<p>Horizonte A, Bw tiene un espesor de 0 - 80 cm; color pardo oscuro, con una textura limo arcillosa, estructura granular con abundante presencia de raíces; conforma al suelo moderno.</p>
	<p>Horizonte 2B, tiene un espesor de 80-120 cm; colores pardo-amarillentos, con textura limo arcillosa, estructura en bloques sub-angulares, poca presencia de raíces muy pequeñas; conforma al primer paleosuelo.</p>
	<p>Horizonte 3Bt; tiene un espesor de 120-160 cm; colores pardo-oscuro, textura franco-arcillo-limoso, estructura en bloques angulares, con presencia de cutanes de estrés, conforma al segundo paleosuelo.</p>
	<p>Horizonte 4Ct; tiene un espesor que empieza a ~200 cm; color pardo-oscuro, textura franco-limosa, estructura muy compacta y dura en bloques, conforma la base del perfil.</p>
<p>Nota: la escala se encuentra dividida cada 10 cm.</p>	

b) Perfil del Rio San Pablo

Dicho perfil se localiza en la planicie del valle (Fig. 6 marca amarilla), con coordenadas N 19° 42' 30.8'' y W 98° 49' 04.2'' a 2317 msnm al Sur del Cerro Gordo. Tomando en cuenta la información generada por Rivera *et al.* (2007); Solleiro *et al.* (2010) y Sánchez (2015), quienes lo describieron anteriormente, este perfil se conforma por cuatro paleosuelos y el suelo moderno, donde se observa poco desarrollo edáfico, formando un perfil constituido, de la parte superior a la base, por horizontes Ap-C-2A-2AC-3A-3C-4A-4AC-5ABti (antes nombrado 5ABss) y 5Bti (Cuadro 2).

Para este trabajo se tomaron muestras de los horizontes: **3A y 5ABti y 5Bti.**

Cuadro 2. Descripción del Perfil Río San Pablo, tomado y modificado de Rivera (2009) y Sánchez (2015).

Perfil Río San Pablo	Características Generales
	<p>Horizonte Ap, tiene un espesor de 0-20 cm, color pardo-oscuro, textura arenosa, con una estructura granular, suelta porosa. Horizonte C, tiene un espesor de 20-27 cm, es un sedimento muy suelto sin estructura, ambos horizontes se encuentran muy antropizados.</p>
	<p>Primer Paleosuelo, tiene muy poco desarrollo, mostrando 3 horizontes, 2A tiene un espesor de 27-40cm, con estructura granular, poco estable y presencia de raíces; 2AC (46-62cm) material es muy suelto con textura franca; 2C (62-90cm) es un sedimento laminar suelto.</p>
	<p>Segundo paleosuelo, presenta poco desarrollo, mostrando 2 horizontes, 3A tiene un espesor de 90-105cm, textura franco-arenosa; estructura granular. 3C tiene un espesor de 105-135cm, es un sedimento laminado con textura franco arcillo limosa, sin estructura.</p>
	<p>Tercer paleosuelo, muestra 2 horizontes, 4A tiene un espesor de 135-170cm, textura franco-arcillosa, presenta una estructura granular con biocanales. Se fechó por ¹⁴C y su edad fue de 2320-1980 Cal a.P. o 370-30 Cal a.C (Beta-210760) (Rivera, 2009). Horizonte 4C (170-185cm), textura franco-arcillo limosa, tiene una estructura prismática, con cierta compactación.</p>
	<p>Cuarto paleosuelo, 5ABti (185-195cm) corresponde al inicio del PNSP teotihuacano, mostrando un mayor desarrollo, con bloques subangulares y una textura arcillo limosa, el horizonte 5Bti >200cm es la base del perfil y fue clasificado como un Vertisol. En el contacto de estos dos horizontes se fechó por ¹⁴C, y su edad fue de 1930-2130 cal yr. BP y 1980-2320 yr. BP (Sánchez, 2015).</p>

c) Cantera de depósitos volcánicos

En las laderas del Cerro Gordo es muy fácil encontrar este tipo de depósitos volcánicos, por lo que, en una cantera de dimensiones de aproximadamente 12 x 6m, se decidió tomar 2 muestras de este depósito (Fig.6 marca verde) descrito a continuación.

Cuadro 3. Descripción del depósito volcánico, ladera sur del Cerro Gordo.

Cantera de agregados pétreos para construcción	Características generales
	<p>Se trata de una secuencia de depósitos piroclásticos que en su parte inferior se componen de lapilli y materiales de escoria volcánica, con estructura soportada grano a grano, los cuales se encuentran afectados por hidrotermalismo generando coloraciones grises y rojas.</p> <p>Sobreyaciendo, se encuentran depósitos de ceniza de estructura pseudolaminada, cubiertos en superficie por un derrame de lava en bloques.</p>
Nota: la escala se encuentra dividida cada 10 cm.	

d) Muestras arqueológicas

Su posición varía dentro de la ZMAT y pertenecen a distintas etapas constructivas en Teotihuacán, en la siguiente figura se muestran su ubicación (Fig.7) y pertenencia en cuanto a etapa constructiva (Fig.8)



Fig.7 Ubicación de las muestras arqueológicas, dentro de la ZMAT, tomado y modificado de Alfaro (2015).

Fecha	Etapas	Monumento
100 a.C. a 150 d.C.	Tzacualli	Pirámide del Sol y Pirámide de la Luna. Asentamiento en Oztoyahualco.
150 d.C. a 300 d.C.	Micaotli Tlamimilolpa	Primera subestructura del Palacio de Quetzalpapalotl. Plataforma del Templo de Caracoles emplumados. Primera subestructura del Templo de Quetzalcoatl, Edificios subterráneos (primera subestructura de edificios superpuestos). Templo de la Agricultura y Templo de los animales mitológicos que posteriormente fueron cubiertos por estructuras posteriores. plataformas adosadas al Templo de Quetzalcóatl, Pirámide del sol y la Luna. Comprende el florecimiento de la ciudad y se construyen casi todos los edificios que hoy conocemos (excepto los nombrados anteriormente).
300 d.C. a 650 d.C.	Xolalapa	La plaza de la Pirámide de la Luna con sus once basamentos y adoratorio central, palacio de Quetzalpapalotl, Conjunto Jaguares, basamentos de la calzada de los muertos, plataforma adosada a la Pirámide del Sol, Ciudadela, conjuntos departamentales.
650 d.C. a 750 d.C.	Metepec	Sobreposición de conjuntos en Tepantitla, Zacuala, Yahualala, Atetelco y la Ventilla. En la zona ceremonial no hay construcciones de la etapa IV.

Fig.8 Etapas constructivas en Teotihuacán, tomado y modificado de Acosta (como se citó en Alfaro-Martínez (2015)).

Leyenda: Zacuala ● Superpuestos Ext.2da ● Conjunto NE Río San Juan ●
 Plaza de la Luna ● Conjunto Plaza Este ● Ciudadela Nte. ● Plaza Oeste. ●

4.2 Caracterización Física

4.2.1 Micromorfología de láminas delgadas

En total se realizaron 16 láminas delgadas (Tabla 1) de las cuales 7 fueron muestras del material arqueológico brindado por la restauradora Mtra. Rosa Liliana Alfaro y autorizado por el Director de la ZMAT, así como 8 extras pertenecientes a materiales recolectados en campo tales como suelos, paleosuelos y depósitos volcánicos aledaños a la zona, en cuanto a la muestra 15 pertenece a un material brindado voluntariamente por una de las integrantes del grupo de Paleosuelos, perteneciente a la plaza de la pirámide del Sol.

Tabla 1. Láminas realizadas, para el estudio micromorfológico.

Número de muestra	Clave de la Muestra	Tipo de material
1	Deposito Caída 1	Deposito volcánico
2	Deposito Caída 2	Deposito volcánico
3	3A-RSP	Paleosuelo
5	5ABti-RSP	Paleosuelo
8	5Bt-RSP	Paleosuelo
4	2Bt-CG	Suelo
6	3Ct-CG	Tepetate superior
7	4Ck-CG	Tepetate inferior
9 K	Conjunto NE, R.S.J	Material Arqueológico
10 K	Plaza de la Luna	Material Arqueológico
11 K	Sup.Ext.2da	Material Arqueológico
12 K	Ciudadela Nte	Material Arqueológico
13 K	Zacuala	Material Arqueológico
14 K	Conjunto Plaza Este	Material Arqueológico
15 K	Plaza Pirámide del Sol	Material Arqueológico
16K	Plaza Oeste	Material Arqueológico

Las muestras 3,5 y 8 marcadas en azul, forman parte del perfil de suelo Río San Pablo, mientras que las muestras 4, 6 y 7 marcadas en rojo, forman parte del perfil de suelo del Cerro Gordo. A partir de la muestra 9K inician las muestras de material arqueológico y solo 10K, 13K y 16K cuentan con una capa de estuco en su superficie.

El análisis micromorfológico tiene por fin determinar las relaciones entre los componentes de la estructura a nivel microscópico. La metodología consiste de varios pasos, que permiten obtener una lámina delgada de una muestra inalterada. Las fases involucradas en el proceso se describen a continuación.

Preparación de muestras

Primera fase: Impregnación

Los bloques inalterados de las muestras recolectadas en campo se impregnaron con resina poliéster y se cubrieron totalmente y fueron llevadas a la bomba de vacío durante 10-15 min, para evitar que se formen burbujas. Posteriormente, se dejaron secar de 3-4 días a temperatura ambiente.

Segunda fase: Corte

Ya endurecidas lo suficiente, las muestras se cortaron, con una cortadora punta de diamante y se le dio la forma y tamaño necesario para montarla en el portaobjetos. Después, las muestras, se devastaron con la maquina pulidora y con la secuencia de lijas, desde la más gruesa de tamaño 80, 120, 220, 360, 400, hasta la lija de tamaño 600, se pulieron de un solo lado de la muestra para obtener una superficie plana y así mejorar su montaje en los portaobjetos.

Tercera fase: Montaje

Teniendo la muestra perfectamente pulida, se colocó en su superficie Resina UV con la cual se montó el cristal y se dejó secar con los rayos del Sol, durante 8-10 segundos.

Fase Final: Pulimiento

Para obtener el grosor final de 30 micras, fue necesario devastar las láminas a mano. Este proceso se realizó en un vidrio con abrasivos de carburo de silicio de 400, 600 y 1000 junto con aceite, se sabe que la muestra tiene el grosor ideal cuando los minerales índices (plagioclasas y cuarzos) presentan sus colores de interferencia de primer orden, para identificar estos se utilizó un microscopio petrográfico sencillo.

Cubrimiento²

Terminada la lámina delgada con su espesor de 30 micras, se procedió a pasarla por el paño para limpiarla de cualquier impureza, para después colocarle Resina UV en su superficie y cubrirse con un porta-objetos delgado.

Análisis micromorfológico

La descripción de las láminas delgadas se realizó en el Laboratorio de Microscopía, del Instituto de Geología, con un microscopio petrográfico *Olympus BX51*. Se utilizó principalmente la guía de Loaiza *et al.*, (2015), para definir los principales rasgos pedológicos y mineralógicos.

² Esta fase puede ser opcional dependiendo del tipo de material que se tenga y los análisis posteriores, sin embargo, para este proyecto, todas las láminas se cubrieron, para evitar su deterioro y contaminación.

Porosidad

Se obtuvo con el software *Image-Pro Plus*, para el mismo microscopio petrográfico, realizando un conteo y promedio en *Excel* de la porosidad de cada lámina.

4.2.2 Análisis de Textura o granulometría

El análisis de textura, está basado en el Manual de Procedimientos Analíticos (Flores y Alcalá, 2010) con algunas modificaciones que se hicieron por parte del grupo de Paleosuelos para su mejora. En dicha técnica se separó la arena, limo y arcilla, mediante el método de los tamices, y de sedimentación de partículas (pipeta), en el laboratorio de Paleosuelos del Instituto de Geología.

Preparación de las muestras:

Se tomó una muestra del material obtenido en campo, se trituró en un mortero cuidando de no destrozarse los fragmentos de roca y posteriormente se tamizó con un tamiz de medida 2mm. De este material tamizado, se pesaron 10g por muestra para realizar el análisis. Los 10g de muestra, se colocaron en frascos *Nalgene* y se les añadió 25ml de agua destilada (proporción 1:2,5). Posteriormente, se agitó un tiempo de aproximadamente 12hrs, para dispersar todas las partículas.

Determinación de arenas (<2mm)

Después de 12hrs, se separó la fracción arena del limo y la arcilla, pasando el material en un tamiz de 56 μ m y lavándolo con agua destilada vigorosamente, dejando solo la arena en el tamiz mientras que la fracción limo y arcilla se deposita en un vaso de precipitados de 150ml para la siguiente determinación. En seguida, la arena de cada muestra se puso a secar a 65°C en la estufa, en capsulas de porcelana, para obtener su peso en seco.

Determinación de la fracción arcilla (2 μ m)

La fracción limo y arcilla, se colocó en probetas de 1L con 10ml de solución de Hexametáfosfato (HMF) y se aforó a 1L con agua destilada. Con la suspensión lista, se agitó y se dejó reposar aproximadamente cuatro horas para la separación de los limos y las arcillas. Pasadas las cuatro horas, se tomó una alícuota de 25ml de limo y arcilla de cada muestra (Fig.9) y dicha alícuota, se colocó en capsulas de aluminio previamente pesadas. Posteriormente se dejaron secar en el horno a 65°C para obtener el peso de la fracción arcilla en seco.

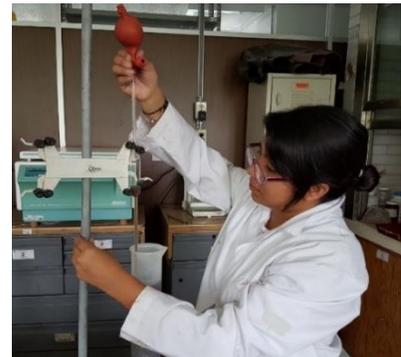


Fig.9 Determinación de textura por método de la pipeta.

Determinación de limo

Al obtener los valores de arenas y arcillas y con el peso inicial de nuestra muestra que fue de 10 g, se realizó en una hoja de cálculo en *Excel* (Ver figuras 40-42) para obtener el peso de los limos que sería la diferencia entre la suma de arenas + arcilla - el peso original de cada muestra. Teniendo los resultados de las 3 fracciones (arena, arcilla y limo) se prosiguió a encontrar sus porcentajes granulométricos, en el triángulo de texturas en (Cano, 2017).

4.3.3 Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad magnética (χ), mide la capacidad de una sustancia para adquirir magnetización mientras se aplica el campo magnético externo (H). Esto se conoce como la magnetización inducida (Evans y Heller, 2003) y puede ser utilizada para diferenciar horizontes de suelo y relacionarlos a los factores formadores del suelo en suelos volcánicos o bien determinar la concentración de óxidos de Hierro principalmente (Rivas *et al.*, 2006).

Preparación de las muestras

Las muestras se trituraron en un mortero de ágata para evitar la contaminación y alteración de las mediciones. Posteriormente, se pesaron los cubos vacíos y se colocó cada muestra en un cubo diferente cubriendo todo el volumen intentando no dejar huecos entre la muestra. Posterior a este paso, los cubos se volvieron a pesar para obtener el peso real de la muestra.

Dicha técnica se realizó en baja frecuencia (Lf) y en alta frecuencia (Hf), utilizando el susceptibilímetro marca *Barrington MS2* (Figs.11 y 12) en el laboratorio de Paleomagnetismo, del anexo del Instituto de Geofísica, UNAM, a cargo de la Dra. Beatriz Ortega.



Fig.11 Medición de la Susceptibilidad, Laboratorio de Paleomagnetismo.



Fig.12 Susceptibilímetro marca *Barrington MS2*

Capítulo 5 Resultados

5.1 Caracterización micromorfológica de los materiales

5.1.1 Micromorfología de materiales naturales

Descripción de los depósitos volcánicos muestras 1 y 2

Las láminas de los depósitos volcánicos muestran macro-morfológicamente (Figs.13 y 14), fragmentos de diversos tamaños que oscilan entre 3 y 0.5 cm, angulares, de coloración marrón claro a marrón oscuro, muy porosos. En el depósito 2, se nota una dominancia de fragmentos con coloraciones rojizas (Fig.14)

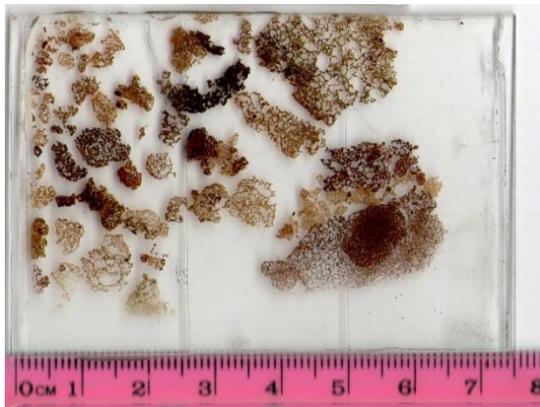


Fig.13 Lámina delgada del depósito de caída 1.

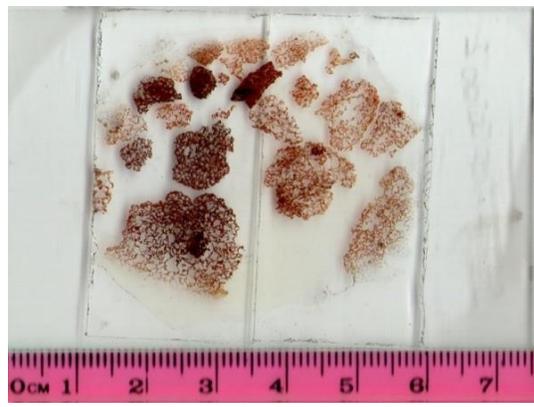


Fig. 14 Lámina delgada del depósito de caída 2.

A nivel **micromorfológico**, en el depósito de caída 1 y 2 se observa un alto contenido de vidrio volcánico y pómez con vesículas (Fig.15, a y b), una coloración marrón oscura variando en algunas zonas (Fig.15, a y d). En cuanto a la fracción mineral, se tienen plagioclasas euhedrales en su mayoría, con un intemperismo débil (Fig.15, c y e) y menores proporciones de anfíboles y olivino (Fig.15, f). En el depósito de caída 2, se tiene un contenido mayor de óxidos de hierro, los cuales tiñen la matriz de rojo (Fig. 15, d).

En ambos casos se obtuvo la porosidad siendo más alta en el depósito de caída 1 con un 42.17% y el depósito de caída 2 con un 32.80% total.

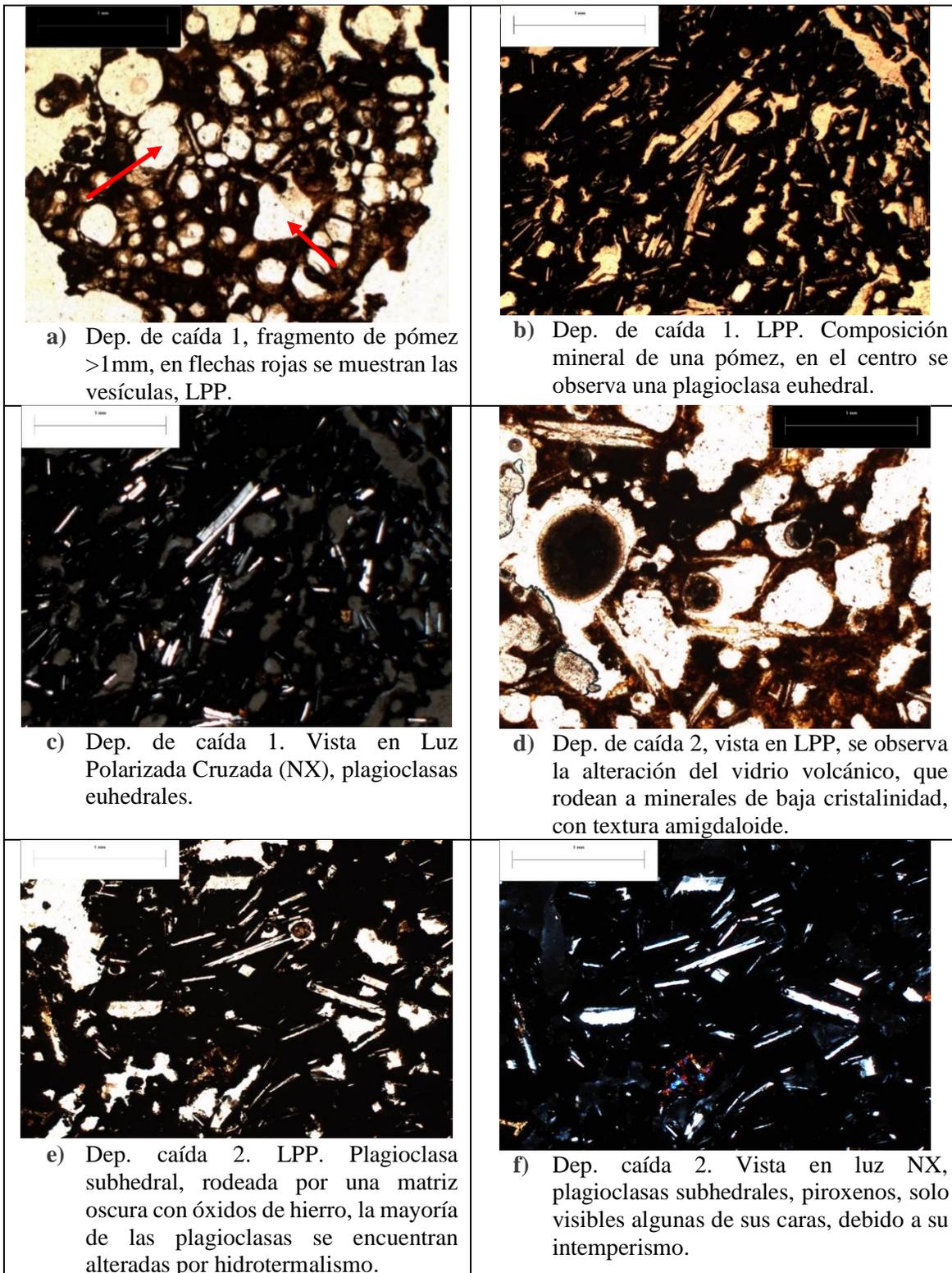


Fig. 15 Fotomicrografías de los depósitos volcánicos muestras 1 y 2

Descripción Muestra 3: 3A- Río San Pablo

Esta muestra pertenece a un horizonte 3A, del Perfil del Río San Pablo, previamente estudiada por Rivera (2009) y Sánchez (2015). Macro-morfológicamente, presenta una coloración marrón claro (Fig.16) con una estructura en bloques subangulares gruesos, con poca porosidad, aunque se observan algunas marcas como grietas.

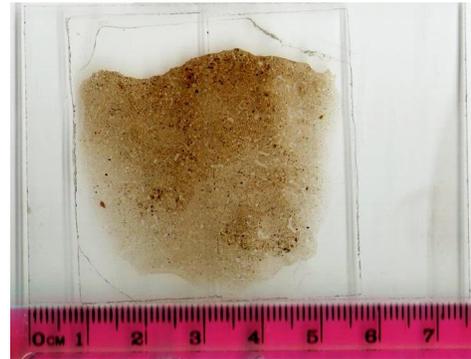


Fig. 16 Lamina delgada del horizonte 3A- R.S.P.

Descripción Micromorfológica: Se observa una estructura en bloques sub angulares (Fig.17, a), en donde dominan los microporos y grietas separando los peds (Fig.17, a y b). La matriz es fina, pero se tienen fragmentos de suelo redepositado y minerales volcánicos como plagioclasas, algunos de los cuales están rodeados por arcilla birrefringente (Fig.17 c y d), que parecen ser cutanes de estrés.

Se calculó la porosidad total de la muestra en: 13.66%

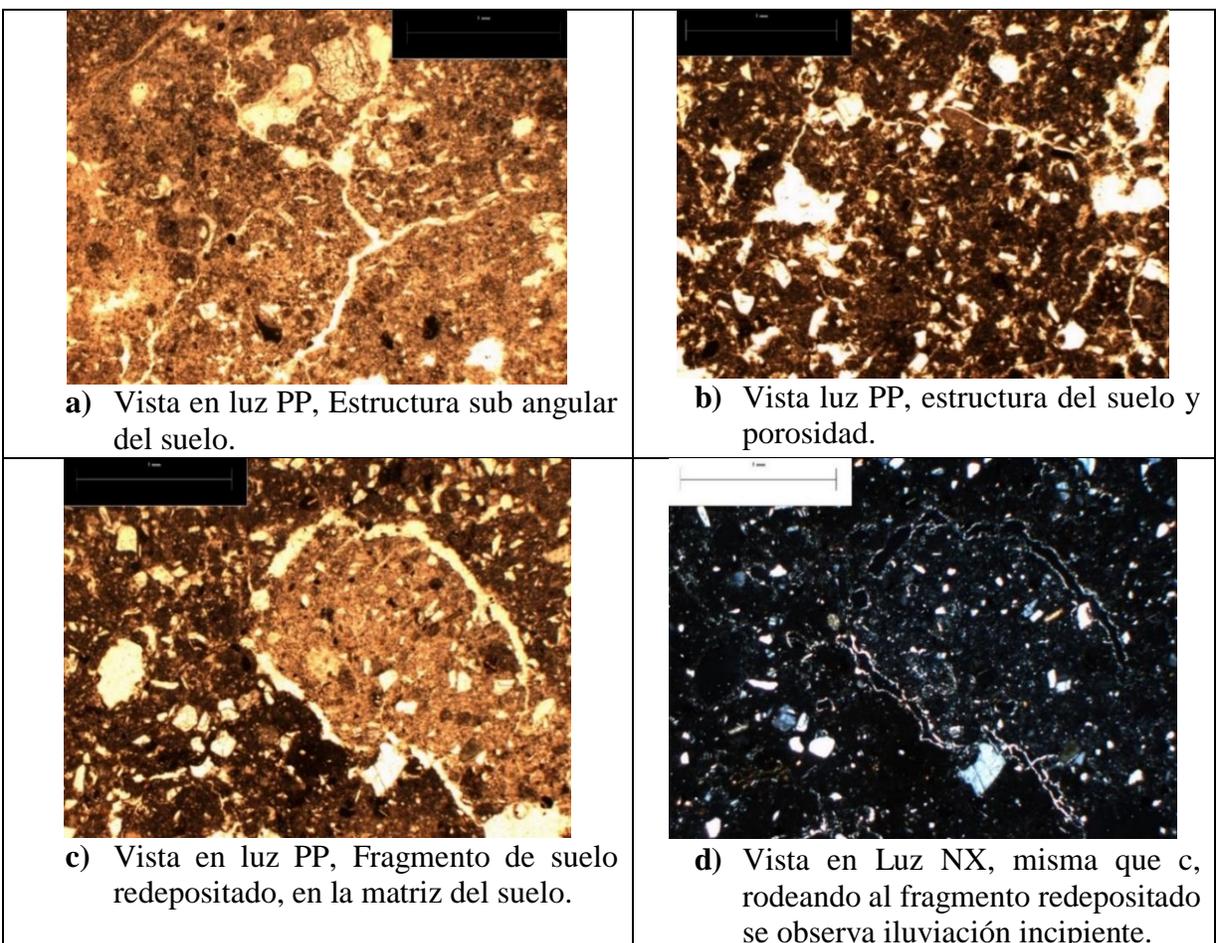


Fig. 17 Fotomicrografías del horizonte 3A- Rio San Pablo

Descripción de muestra 5: 5ABti Rio San Pablo

Muestra de suelo mucho más oscura que las anteriores, obtenida del Río San Pablo, el cual pertenece al horizonte 5ABti del paleosuelo negro descrito con más detalle por Sánchez (2015) (Fig.18).

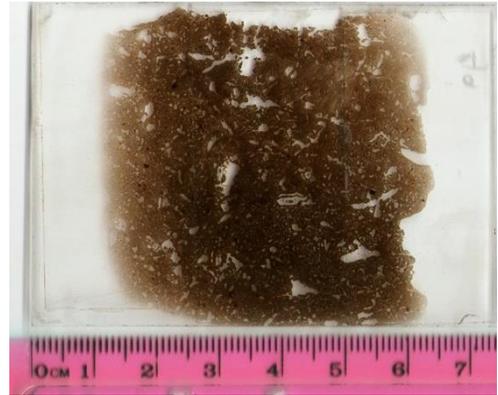
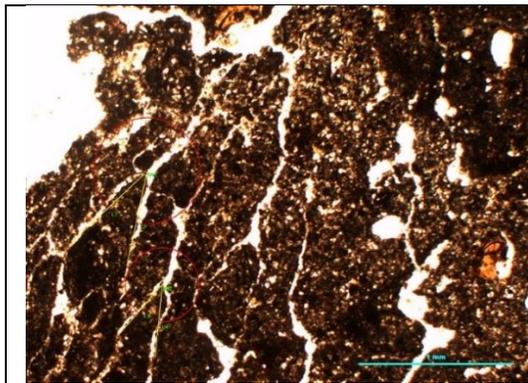


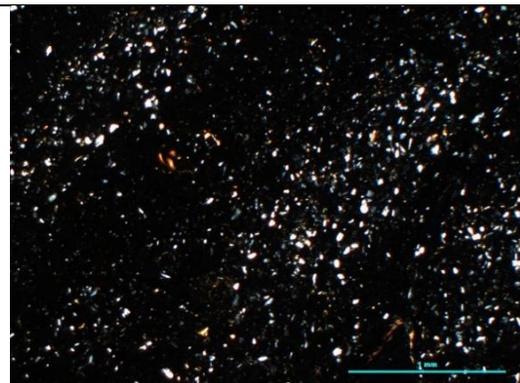
Fig. 18 Lámina delgada del horizonte 5ABti R.S.P.

Descripción micromorfológica: Estructura en bloques angulares (Fig.19, a). Los ángulos de los bloques son de 30-60°, que demuestra propiedades de suelos vérticos (Fig.19, a). En cuanto a la fracción mineral, en su mayoría, son minerales muy pequeños menores a 0.5mm (Fig.19, b), anhedrales e incluso redondeados. En los poros se tiene revestimientos arcillosos delgados (Fig. 19, c y d) pero en algunas zonas éstos son gruesos y continuos a lo largo de pedocanales (Fig. 19, e y f).

Porcentaje de porosidad del 15.62%



a) Vista LPP, estructura angular del suelo, formando ángulos de ~35°. La matriz del suelo es muy oscura y fina



b) Vista en NX, abundante fracción mineral. En su mayoría se trata de feldespatos sub redondeados

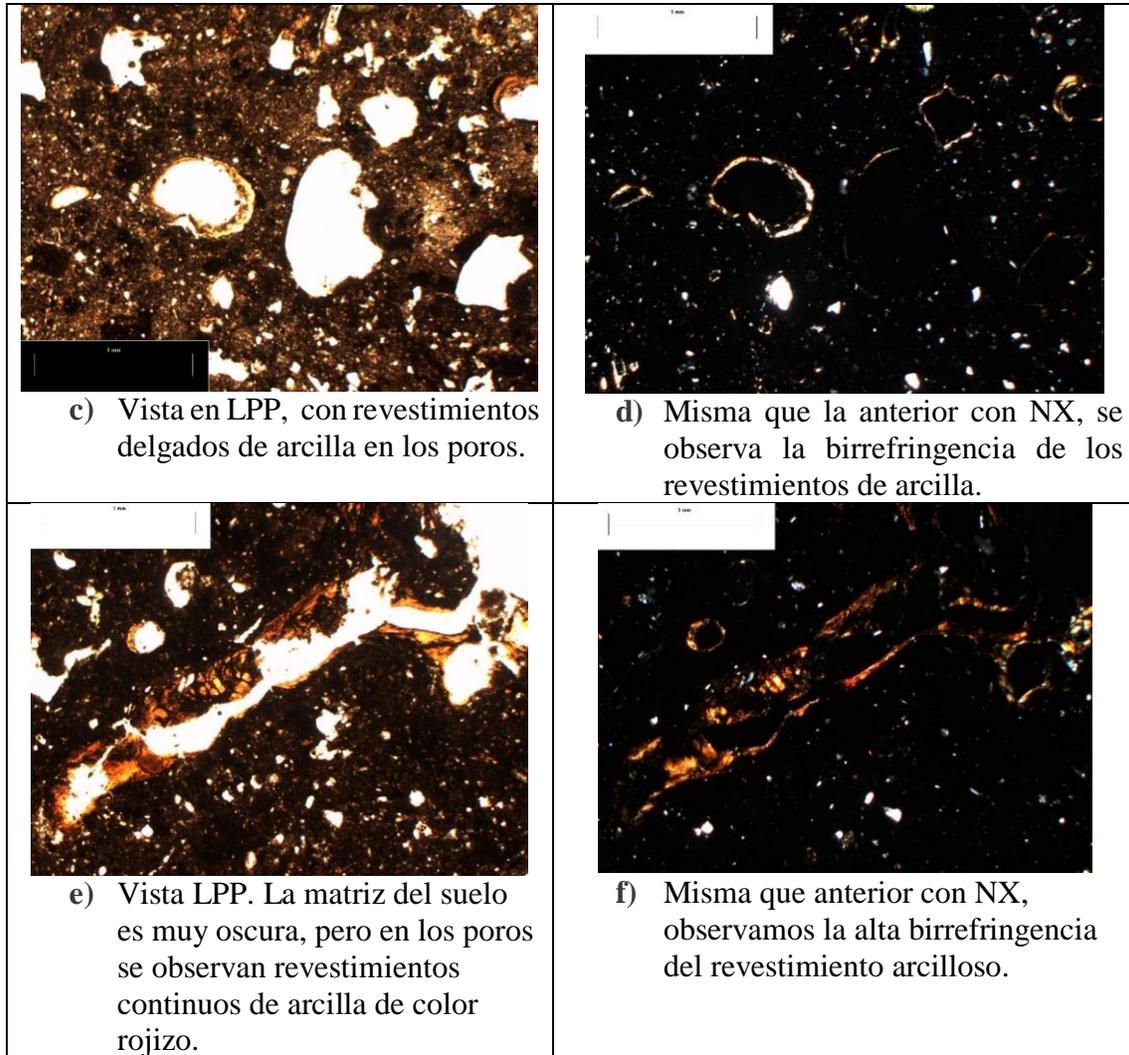


Fig.19 Fotomicrografías del horizonte 5ABti Río San Pablo

Descripción Muestra 8: 5Bti R.S.P.

Esta muestra pertenece a la base, horizonte 5Bti, del perfil del Río San Pablo. Posee una estructura en bloques sub angulares, de una coloración marrón oscuro, con una alta porosidad entre los bloques (Fig.20)

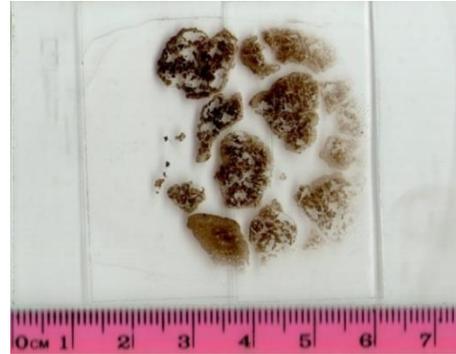


Fig.20 Lámina de la muestra 5Bti R.S.P

Descripción micromorfológica: Observamos una estructura en bloques sub angulares en una matriz fina (Fig.21 a y c), la porosidad es abundante y visible en forma de grietas y pedotúbulos (Fig.21, c). Algunos de los peds parecen fragmentos de suelo redondeado (Fig. 21, c). Los minerales son escasos y con diversos grados de intemperismo, desde minerales frescos (fig. a y b) hasta formas muy alteradas (Fig. 21, c y d). También se observan revestimientos arcillosos, algunos de los cuales son semejantes a cutanes de estrés (Fig. 21, b). Porosidad: 20.15%

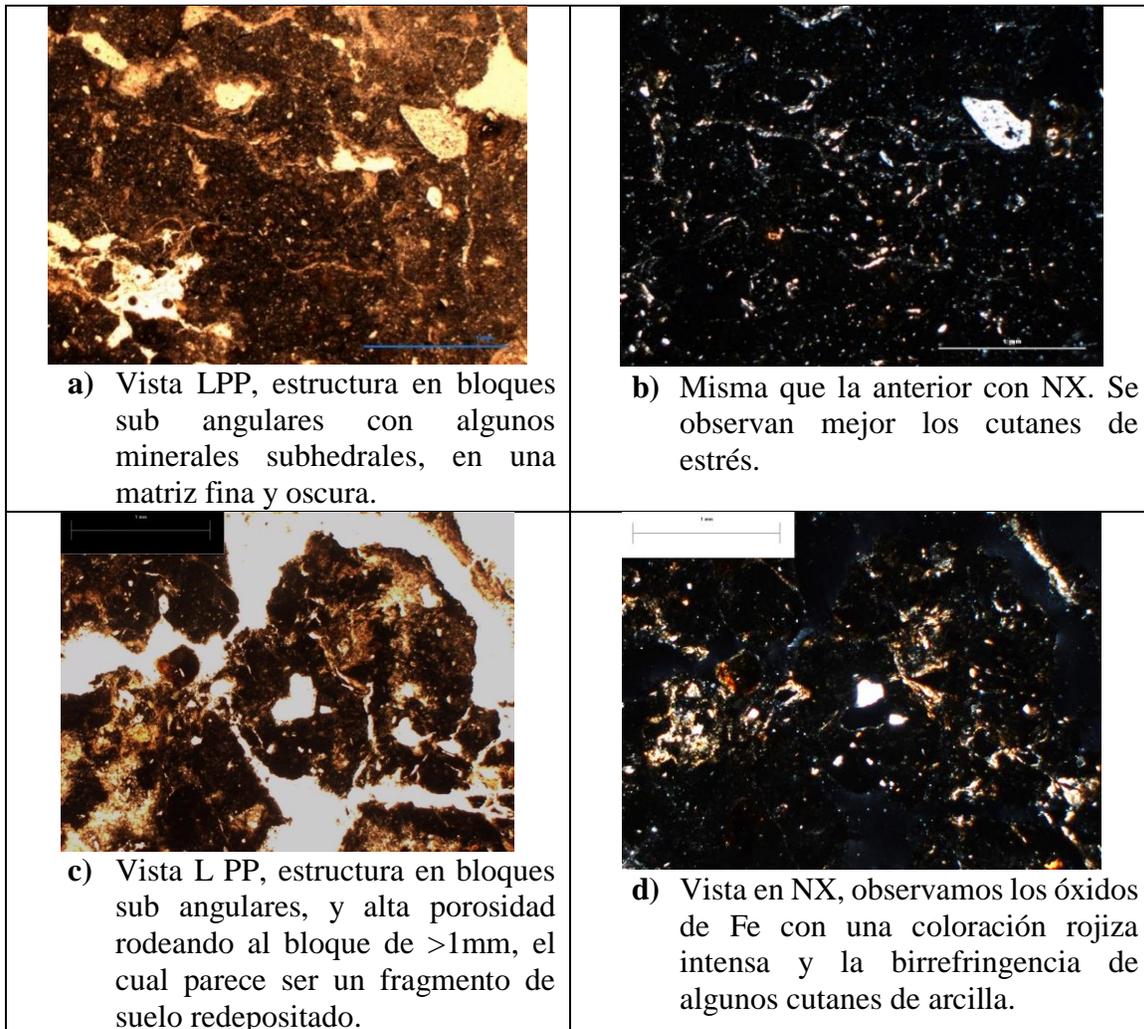


Fig. 21 Fotomicrografías del horizonte 5Bti RSP

Descripción muestra 4: 2Bt-Cerro Gordo

Esta muestra presenta una estructura en bloques sub angulares (Fig.22). El color es marrón más oscuro, comparado con las siguientes muestras.

Descripción Micromorfológica: La fracción mineral muestra cristales subhedrales-anhedrales de plagioclasas, algunos cuarzos y biotitas, minerales típicos de suelos volcánicos, con poco grado de intemperismo (Fig. 23, a y b). Se observa una gran cantidad de revestimientos arcillosos gruesos y continuos (Fig.23 c y d).

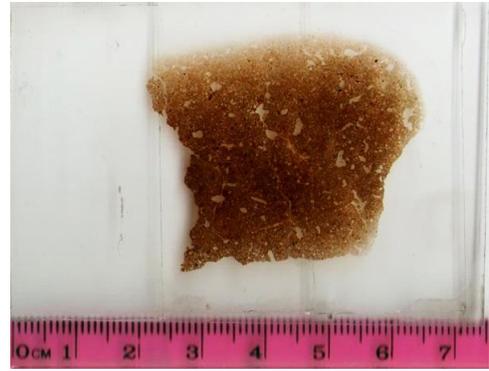


Fig.22 Lámina delgada del horizonte 2Bt C.G

Porosidad del: 19.89%

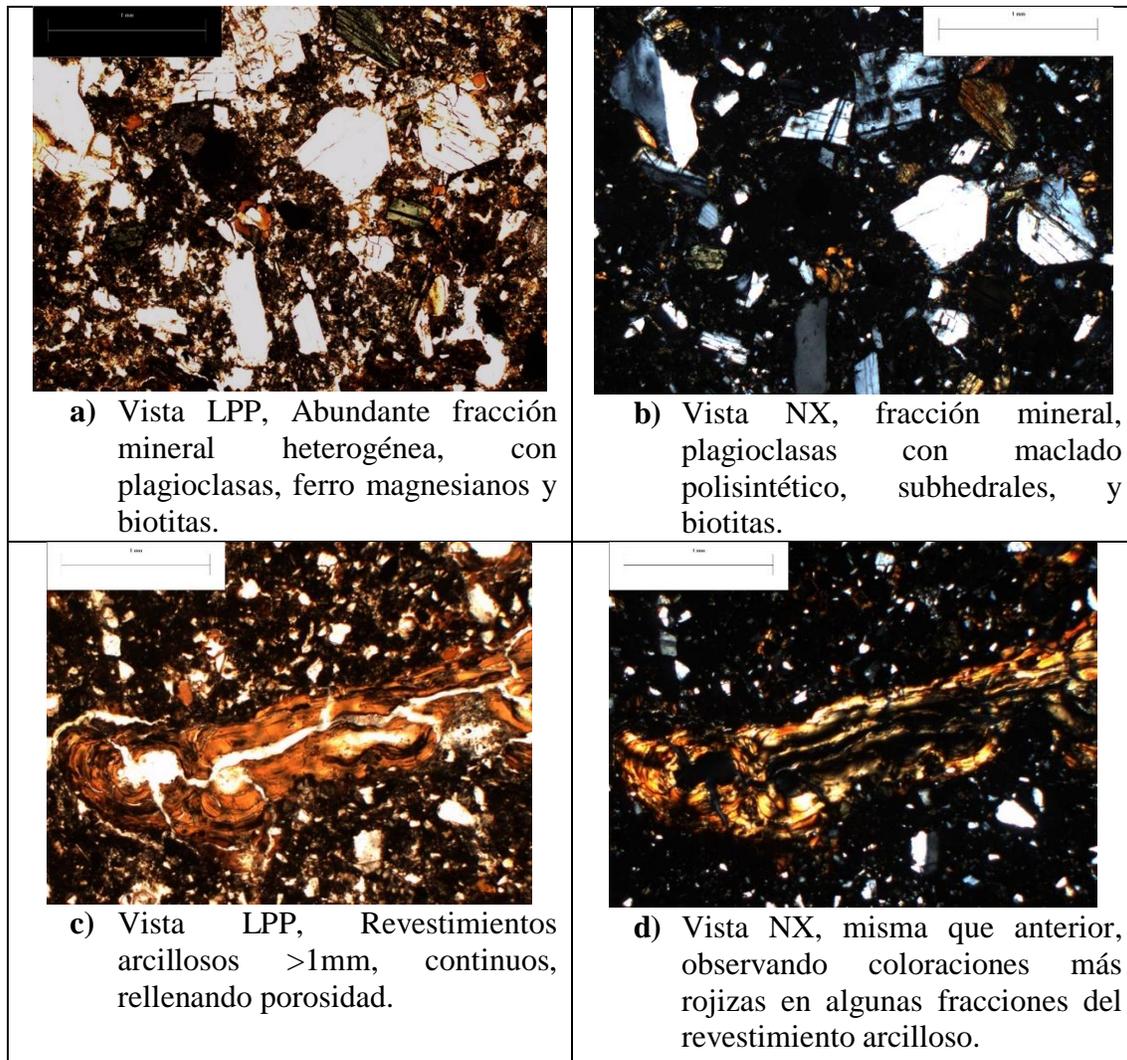


Fig. 23 Fotomicrografías del horizonte 2Bt-Cerro Gordo.

Descripción de muestra 6: 3Bt Cerro Gordo

Esta lámina corresponde al horizonte 3Bt (sepultado por el 2Bt anterior). La estructura es en bloques subredondeados con baja porosidad (Fig.24).

Descripción micromorfológica: se observa una estructura en bloques sub angulares (Fig.25, a, b y c), con revestimientos arcillosos de coloraciones rojizas (Fig.25, a, b y c) formando canales recubiertos de arcilla, en algunos casos formando ángulos entre 30 y 45° (Fig.25 b) y otros formando ángulos prácticamente rectos (Fig.25, c). En cuanto a la fracción mineral, encontramos feldespatos, anfíboles y poco cuarzo (Fig.25, d), en su mayoría con formas anhedrales e incluso redondeadas.

Porosidad: 7.88%

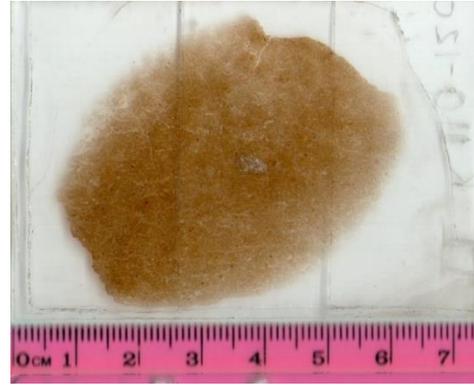


Fig.24 Lámina delgada del horizonte 3Bt C.G.

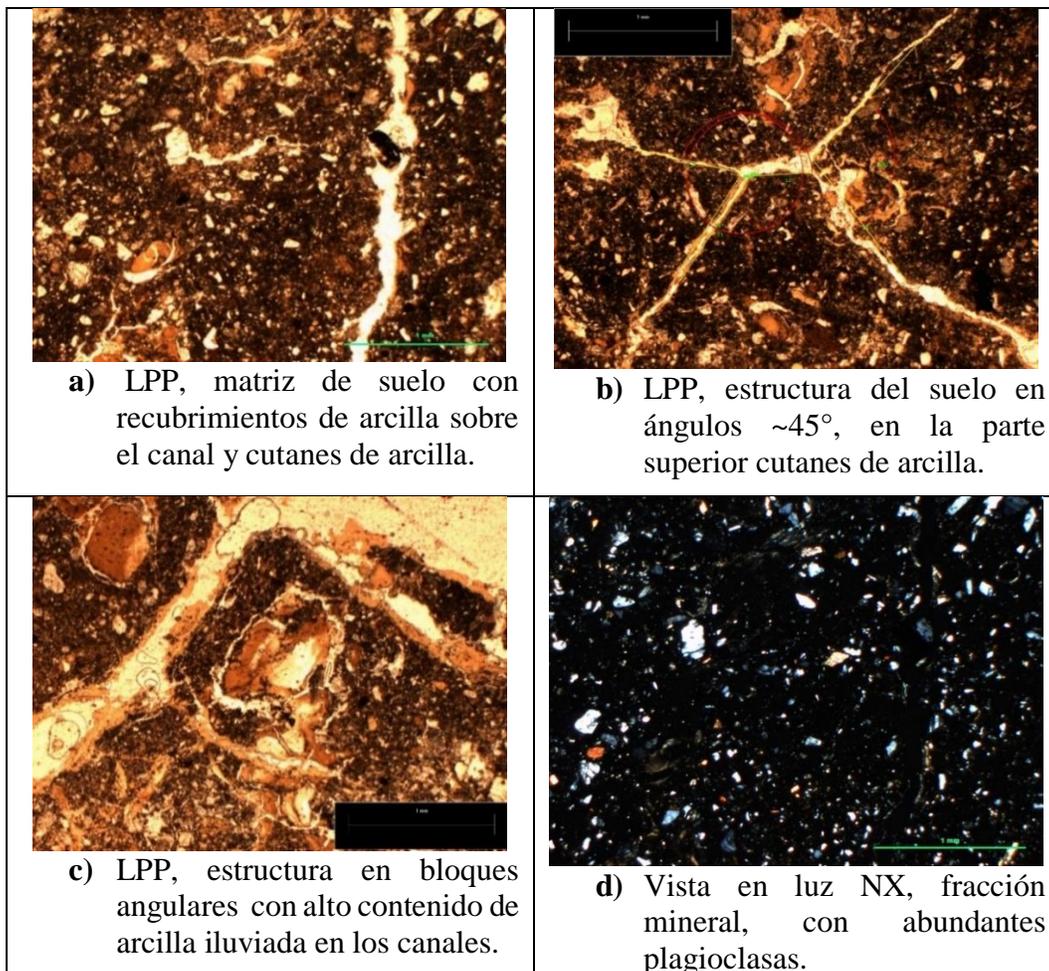


Fig. 25 Fotomicrografías del horizonte 3Bt-Cerro Gordo

Descripción de muestra 7: 4Ct – Cerro Gordo

Esta muestra pertenece al mismo perfil del Cerro Gordo, del horizonte 4Ct. Su estructura es en bloques subangulares de color pardo-rojizo. Se observan pequeños fragmentos negros de al menos 1mm, probablemente acumulaciones de óxidos de Fe (Fig.26).

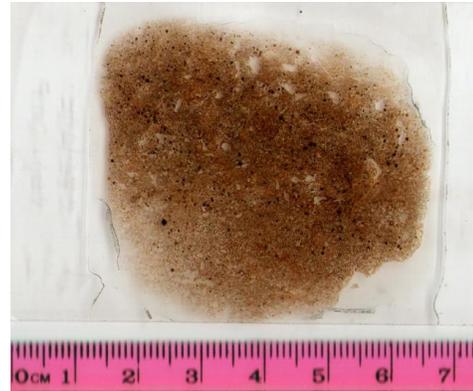


Fig.26 Lámina delgada del horizonte 4Ct - C.G.

Descripción micromorfológica: Observamos una estructura sub angular (Fig.27, a). Rodeando a los poros encontramos revestimientos de arcilla finos de 3-4 micras de espesor (Fig.27, b), aunque también hay otros gruesos y continuos (Fig. 27, c y d). Las “manchas” negras observadas en la lámina son óxidos de hierro. En cuanto a la fracción mineral, está compuesta por plagioclasas subhedrales y abundantes biotitas subhedrales-anhedrales (Fig.27, b y d) muy alteradas a tal punto que existen ya cloritas, producto de un intemperismo muy alto en los minerales (Fig. 27, c y d).

Porosidad: 10.42%

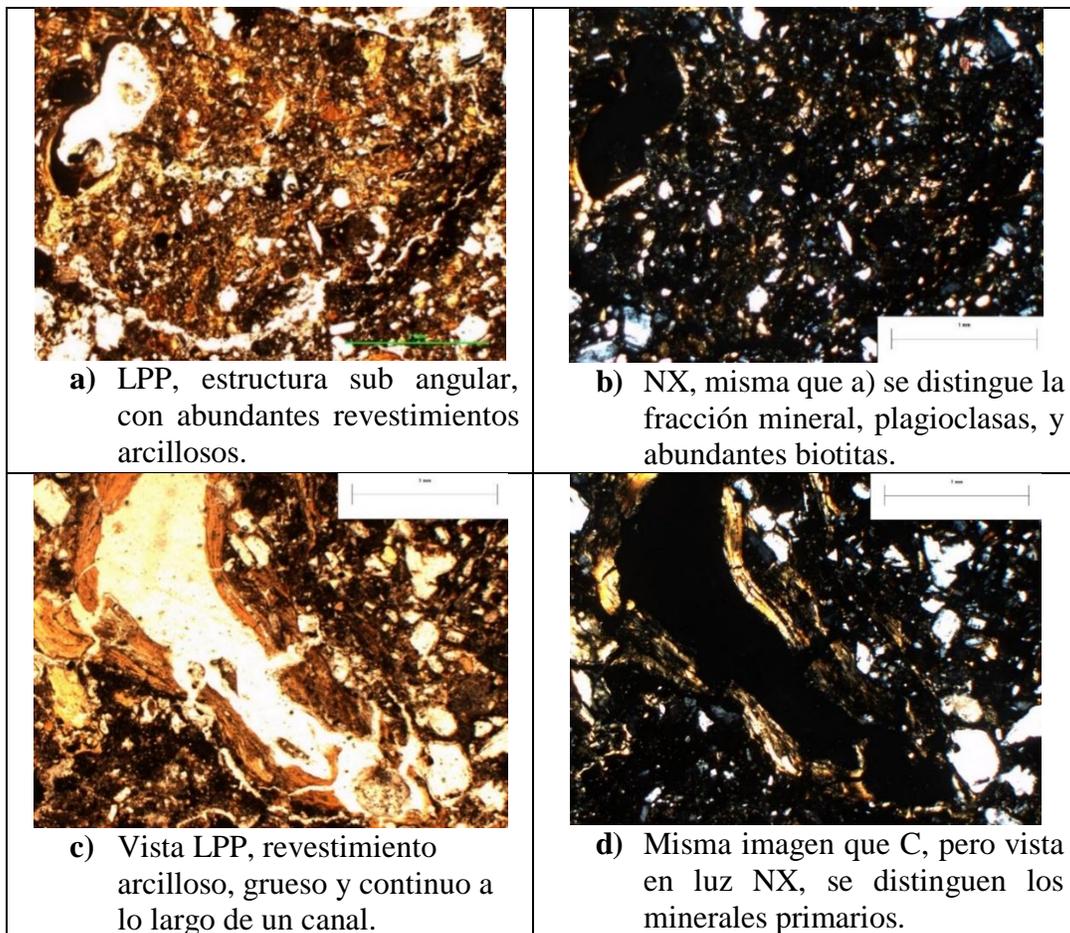


Fig. 27 Fotomicrografías del horizonte 4Ct-Cerro Gordo.

5.1.2 Micromorfología de muestras arqueológicas parte 1

Las muestras arqueológicas, fueron agrupadas en función de su tipo: **a)** materiales con dominancia volcánica y fragmentos de suelo; y **b)** Materiales con estucos (que contienen las pastas de grano fino carbonatado).

a) Materiales con dominancia volcánica y fragmentos de suelo

En este grupo concentramos a las muestras 9K, 11K, 12K, 14K y 15K. Las láminas de cada una de estas muestras se presentan en las Figuras 28-32.

Macromorfológicamente estas muestras demuestran una estructura clástica compuesta de fragmentos de roca de tamaños similares, excepto en 11K, en donde se presentan fragmentos de roca de mayor tamaño (Fig. 29). A simple vista destacan los fragmentos de roca porosa, vesiculado y pómez. En 12K, se observa, aunque de manera difusa, un estuco, localizado en la parte superior derecha (Fig. 30).



Fig. 28 Lámina delgada de la muestra 9K, Muestra Conjunto NE, Río San Juan
Porosidad: 23.86%



Fig. 29 Lámina delgada de la muestra 11K, Superpuestos Ext. 2da Etapa.
Porosidad: 31.38%



Fig. 30 Lámina delgada de la muestra 12K, Ciudadela Nte.
Porosidad: 24.14%



Fig. 31 Lámina delgada de la muestra 14K, Conjunto Plaza Este
Porosidad: 11.04%

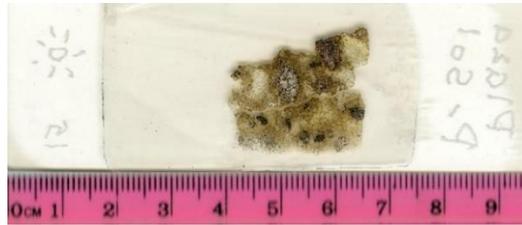
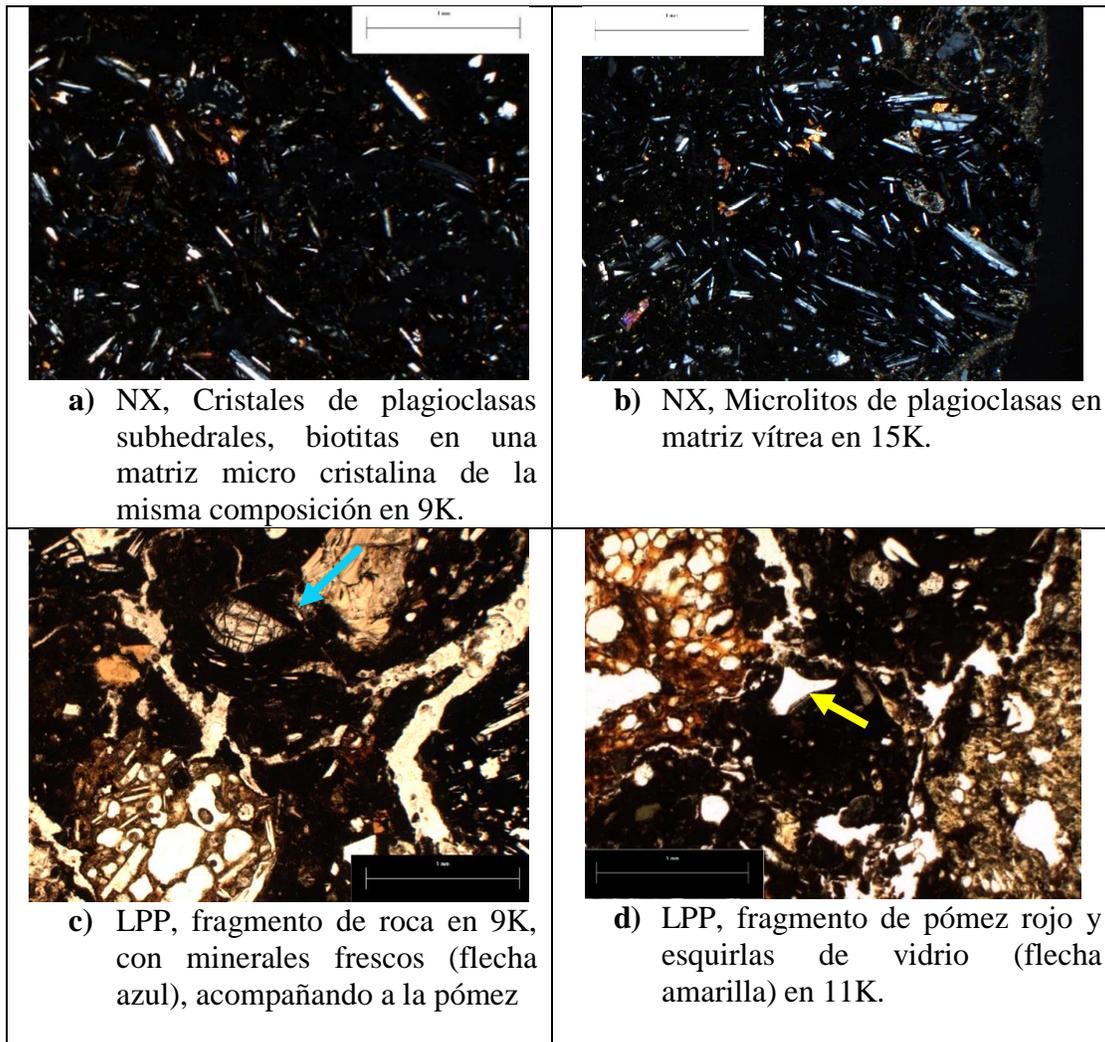


Fig. 32 Lámina delgada muestra 15K Plaza del Sol. **Porosidad: 23.57%**

Las observaciones micromorfológicas se centraron en identificar el tipo de materiales que se encuentran en las muestras arqueológicas.

En todas las muestras destaca la presencia de minerales volcánicos, como plagioclasas subhedrales con estructura fluidal traquitoide en 9K (33, a y b), similar a la observada en los depósitos volcánicos de caída (Fig. 15). La pómez es el constituyente más abundante en estas muestras (Fig.33, f), así como el vidrio volcánico, que, en ocasiones conserva su estructura fluidal (Fig. 33, e).



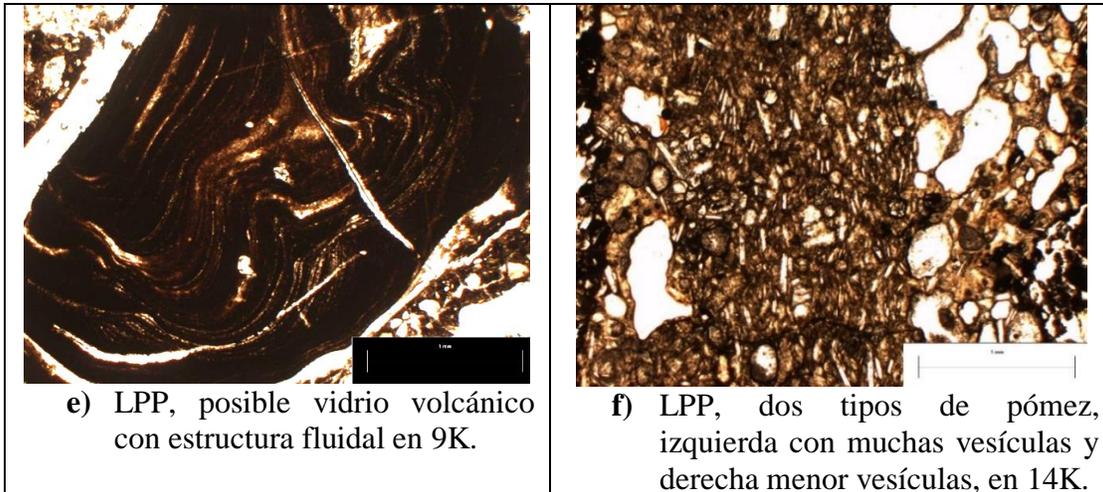
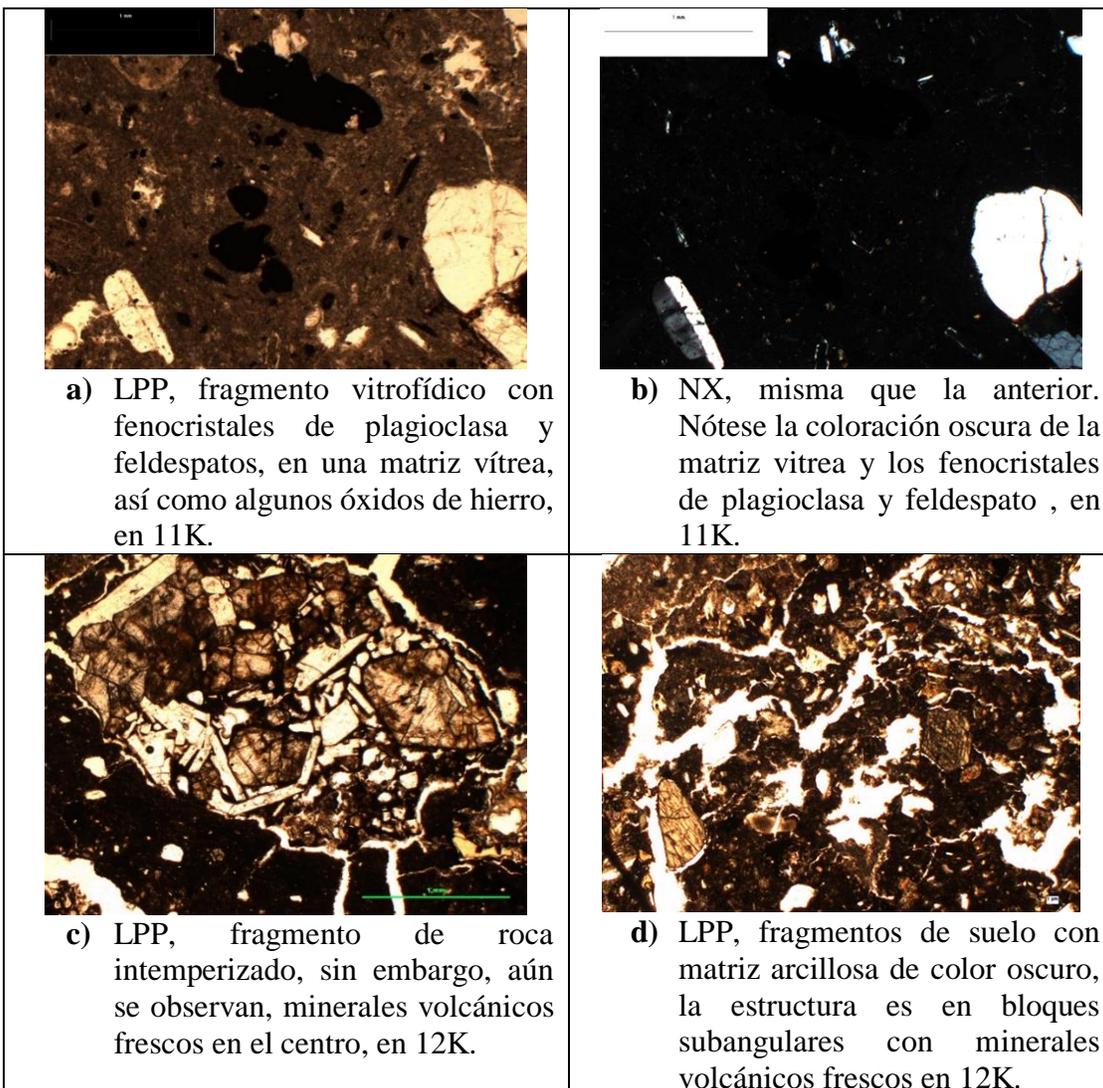


Fig. 33 Microfotografías de muestras con predominancia volcánica, parte 1.



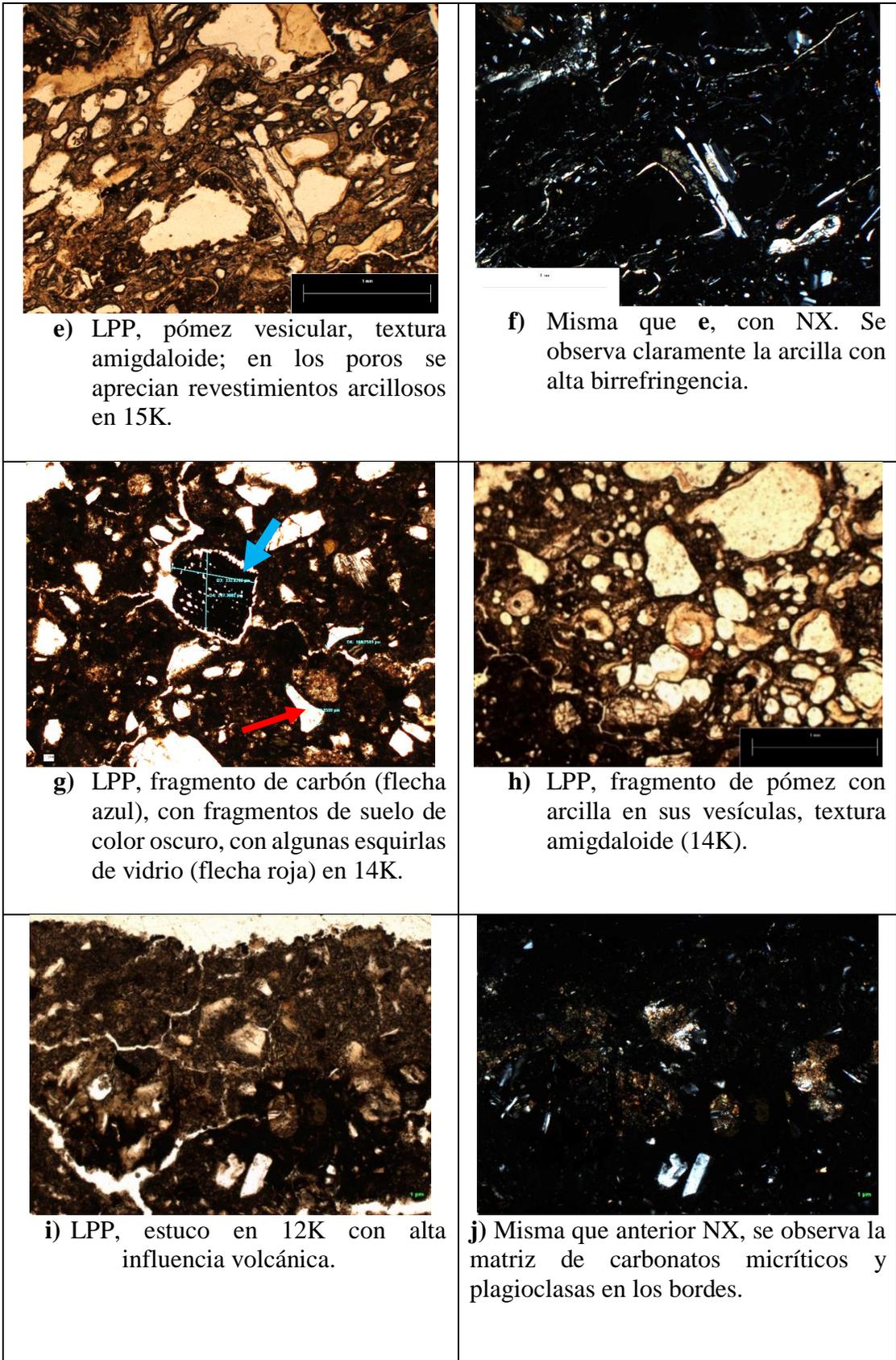


Fig.34 Fotomicrografías de las muestras con predominancia volcánica, parte 2.

Otro componente común en estas muestras es la presencia de fragmentos de suelo que evidencian diversos grados de desarrollo. Por un lado, se tienen morteros con una matriz arcillosa de color pardo-rojiza en la que destacan minerales euhedrales frescos, como plagioclasas, así como óxidos de hierro (Fig. 33, c y Fig. 34, a, b). En otras muestras, se aprecian fragmentos de suelo con estructura en bloques angulares y subangulares muy oscuros, que contrastan con la presencia de minerales volcánicos frescos (Fig. 34, c, d, g), además de algunos fragmentos de pómez muy intemperizados o con presencia de hidrotermalismo, cuyas vesículas están rellenas de revestimientos arcillosos (Fig.34, h).

El segundo elemento que destaca es carbón vegetal, el cual aún conserva la estructura celular, vinculado probablemente a fragmentos del Paleosuelo Negro San Pablo (PNSP) estudiado anteriormente por Sánchez *et al.* (2013) (Fig. 34, g).

Es interesante que en la muestra de la Ciudadela Nte (12K), también se observan los restos del estuco, marcado con carbonatos micríticos alrededor de los agregados, sin embargo, este no se encuentra tan definido como el estuco de las siguientes muestras. (Fig. 34, i y j).

5.1.3 Micromorfología de muestras arqueológicas parte 2

b) Materiales con estuco

Las muestras arqueológicas que tiene estuco son: 10K, 13K y 16K. Todas estas muestras exhiben con mucha claridad la presencia del estuco, que cubre el mortero (Figs.35-37). Los componentes relacionados a este último tienen una estructura masiva y con una abundancia de fragmentos de roca, entre las que destacan las pómez, que muestran una alta densidad de vesículas. En la muestra Zacuala, los componentes son gruesos (Fig.36) en tanto que, en la muestra Plaza Oeste, la matriz es más fina (Fig.37, c).



Fig. 35 Lámina delgada de la muestra Plaza Luna (10K).
La flecha roja indica el estuco y por debajo se encuentra el mortero.
Porosidad: 20.28%



Fig.36 Lámina delgada de la muestra Zacuala 13K.
Porosidad: 15.28%



Fig.37 Lámina delgada de la muestra Plaza Oeste (16K).
Porosidad: 17.25%

Descripción micromorfológica

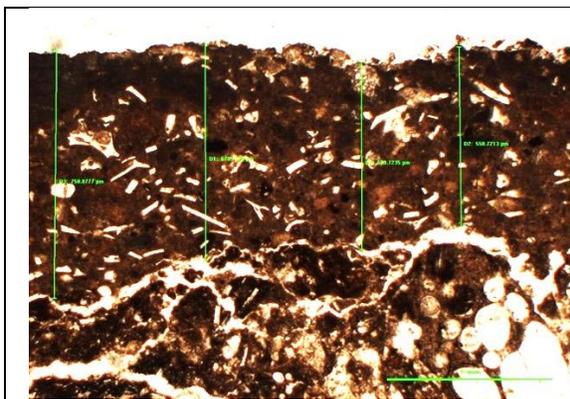
A pesar de que todas las muestras señaladas son similares en cuanto a la superficie con estuco, también se observan ciertas diferencias.

Entre las similitudes destaca una matriz micrítica en todos los casos, con esquirlas de vidrio en su matriz, una fracción mineral cristalina poco abundante (plagioclasas, principalmente), fragmentos de minerales opacos y óxidos de hierro (Fig. 38). Las diferencias que se tienen radican en la proporción y el tamaño en las que se presentan estos componentes.

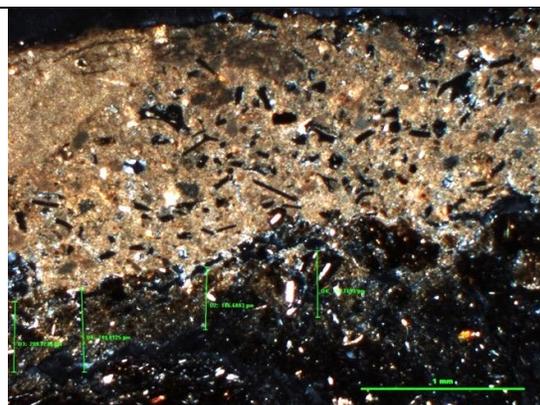
En la Plaza de la Luna (10K), los tamaños son más pequeños (entre 100 y 200 μm), de tal forma que la proporción de micrita es mayor y se observa que los granos minerales “flotan” en esta matriz micrítica, la cual también es más birrefringente (Fig. 38, a y b).

El estuco de Zacuala (13K), tiene esquirlas de vidrio de mayor tamaño. El estuco es de menor birrefringencia, que está relacionado con su menor grado de cristalinidad o a que los microcristales son más finos (Fig. 38, c, d). Justo debajo de este estuco, se tiene otra delgada capa de estuco con fragmentos de mayor tamaño de micrita, lo cual podría relacionarse con una capa de cal anterior al estuco, menos cuidada en su preparación.

En el caso del estuco Teotihuacano, las diferencias estriban en que el estuco tiene fragmentos de mayor tamaño (Fig. 38, e, f).



a) LPP. Estuco de la Plaza de la Luna (10K). Las líneas verdes indican el espesor: en su matriz se muestran las esquirlas de vidrio.



b) NX, muestra el estuco y su micrita brillante. Debajo del estuco se tiene una micrita de material más isotrópico, 150-250 μm , en 10K

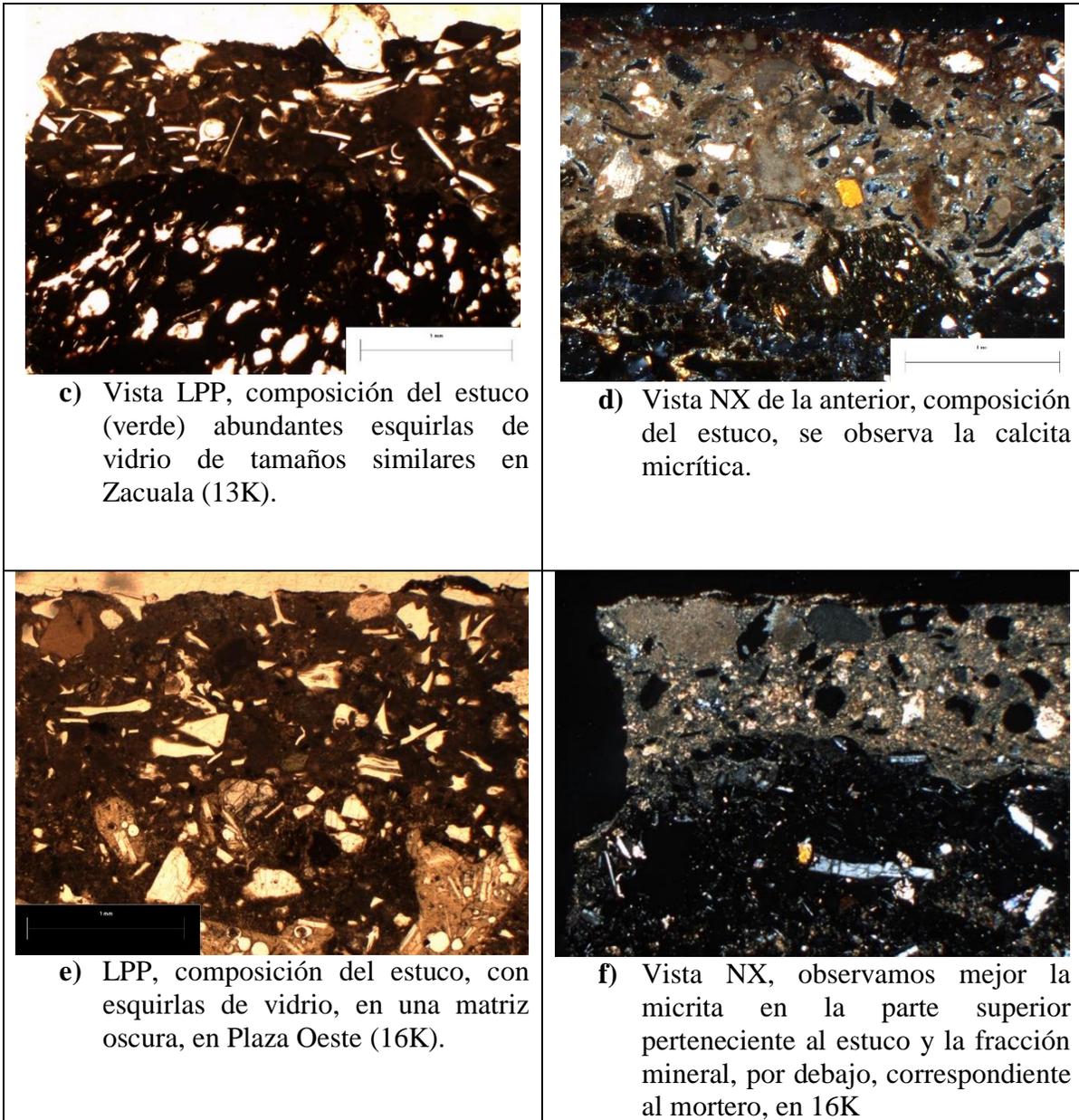


Fig. 38 Fotomicrografías de las muestras con estuco, parte 1.

Al aplicar luz reflejada (LR) en las láminas delgadas, se obtiene una visión complementaria a las ya expuestas. Un rasgo que se hace notorio es una fina capa de color anaranjado en la superficie del estuco, que evidencia la presencia de óxidos de hierro, los cuales podrían pertenecer a la pintura utilizada para pintar el estuco (Fig.39, a, b, c). Con esta técnica también resalta y se diferencian las capas de estuco presentes en la muestra, como es el caso de Plaza de la Luna y Zacuala (Fig.39, a, b).

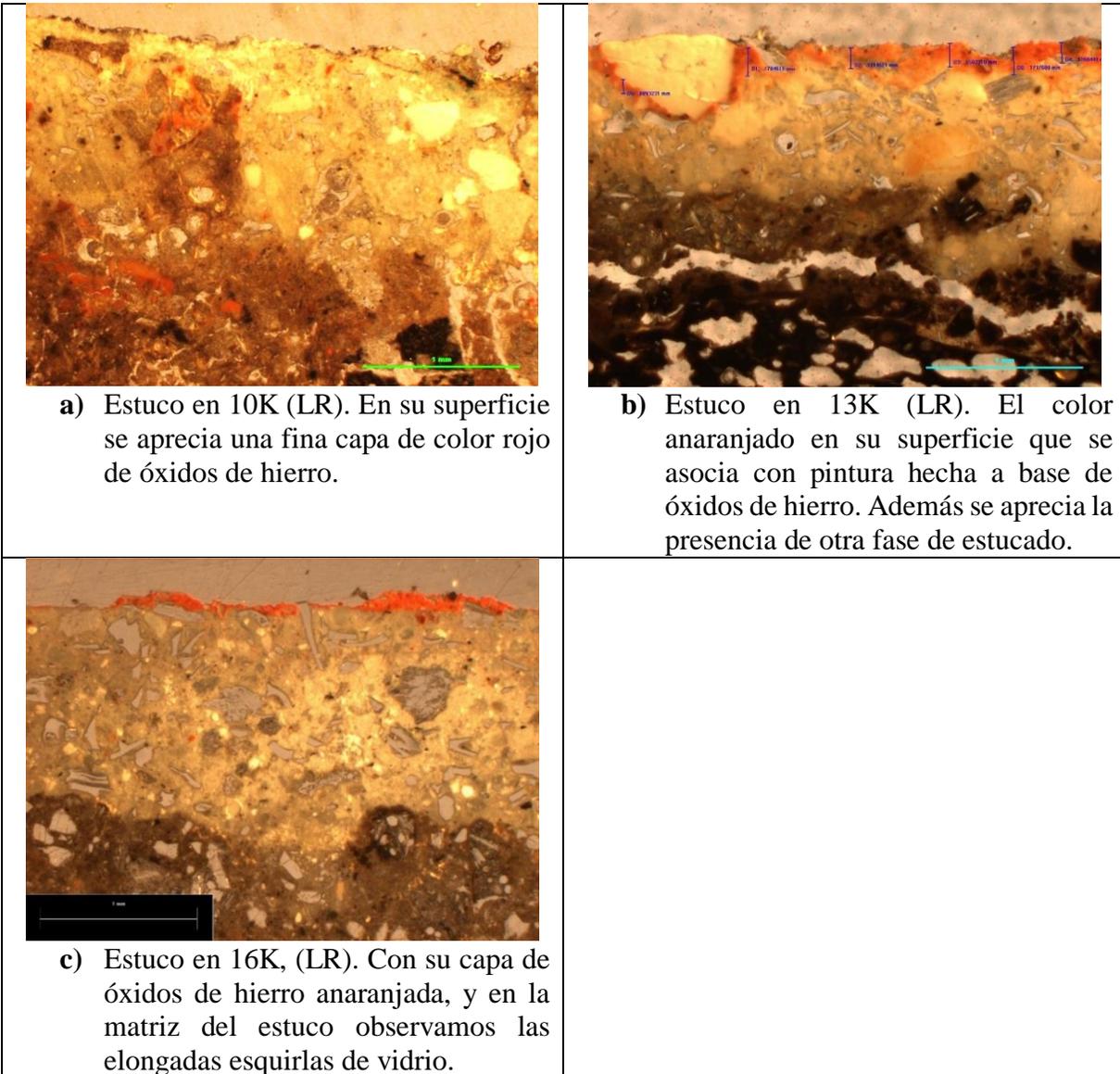
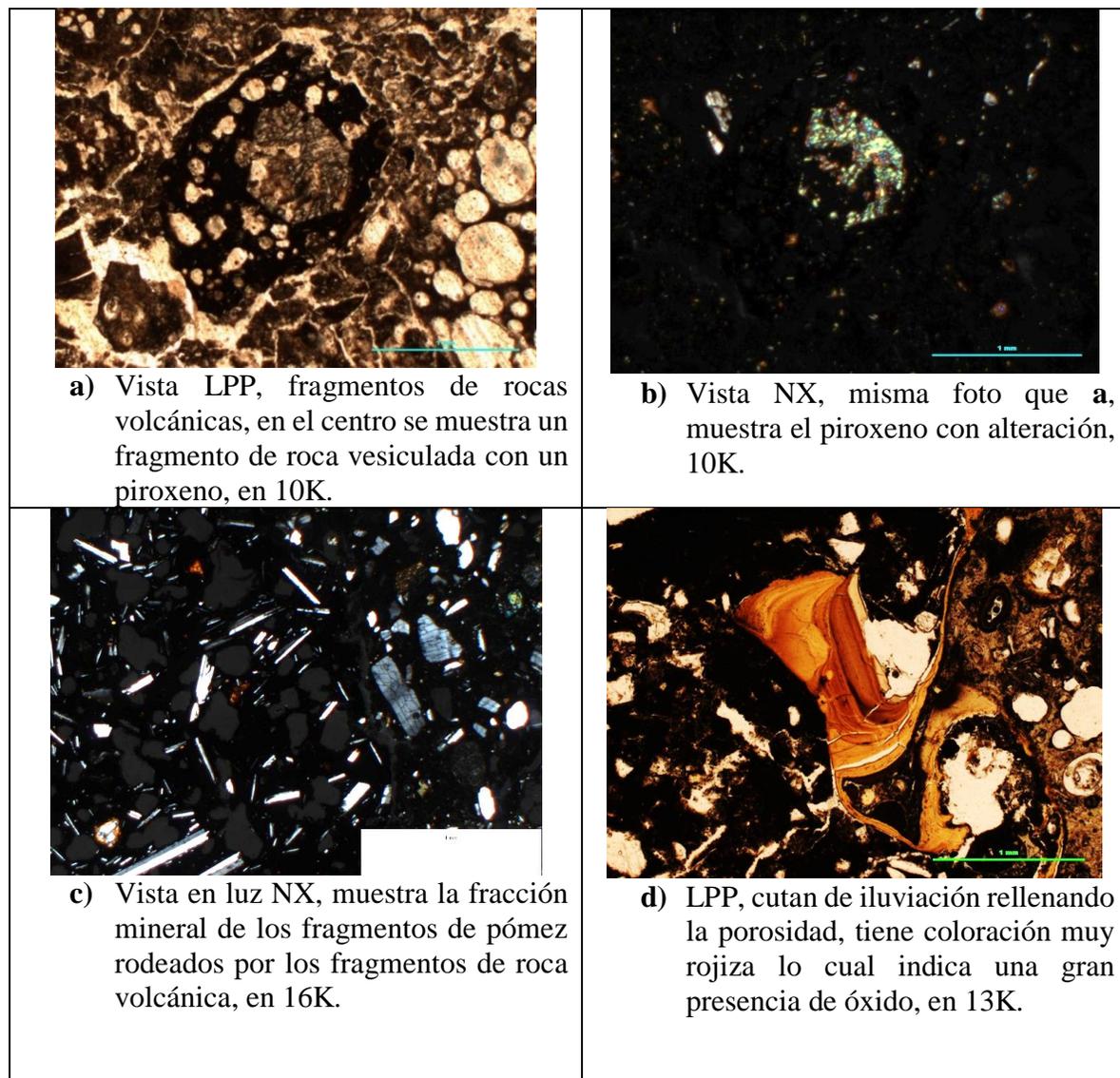


Fig. 39 Fotomicrografías de las muestras con estuco (LR), parte 2.

En cuanto a la composición del mortero, las muestras contienen principalmente fragmentos de rocas volcánicas tales como pómez alargadas con muchas vesículas, fragmento de rocas con composición basáltica, en los que inclusive destaca la presencia de olivinos intemperizados (Fig.40, a, b), similares a los observados en los depósitos de caída 2. También se tienen otros componentes como fenocristales de plagioclasas (Fig. 40, c), revestimientos arcillosos gruesos (Fig.40, d), fragmentos de carbón (Fig. 40, e), pómez intemperizada con revestimientos arcillosos (Fig.40, f). Un rasgo adicional que resalta, es la presencia de una rizo concreción de carbonato, que se asemeja a las descritas por Valera (2016) en paleosuelos del valle de Teotihuacán (Fig.40, g y h).

Todos los componentes anteriores, muestran que el mortero tiene una alta afinidad con los paleosuelos de Teotihuacán, así como con los depósitos volcánicos.



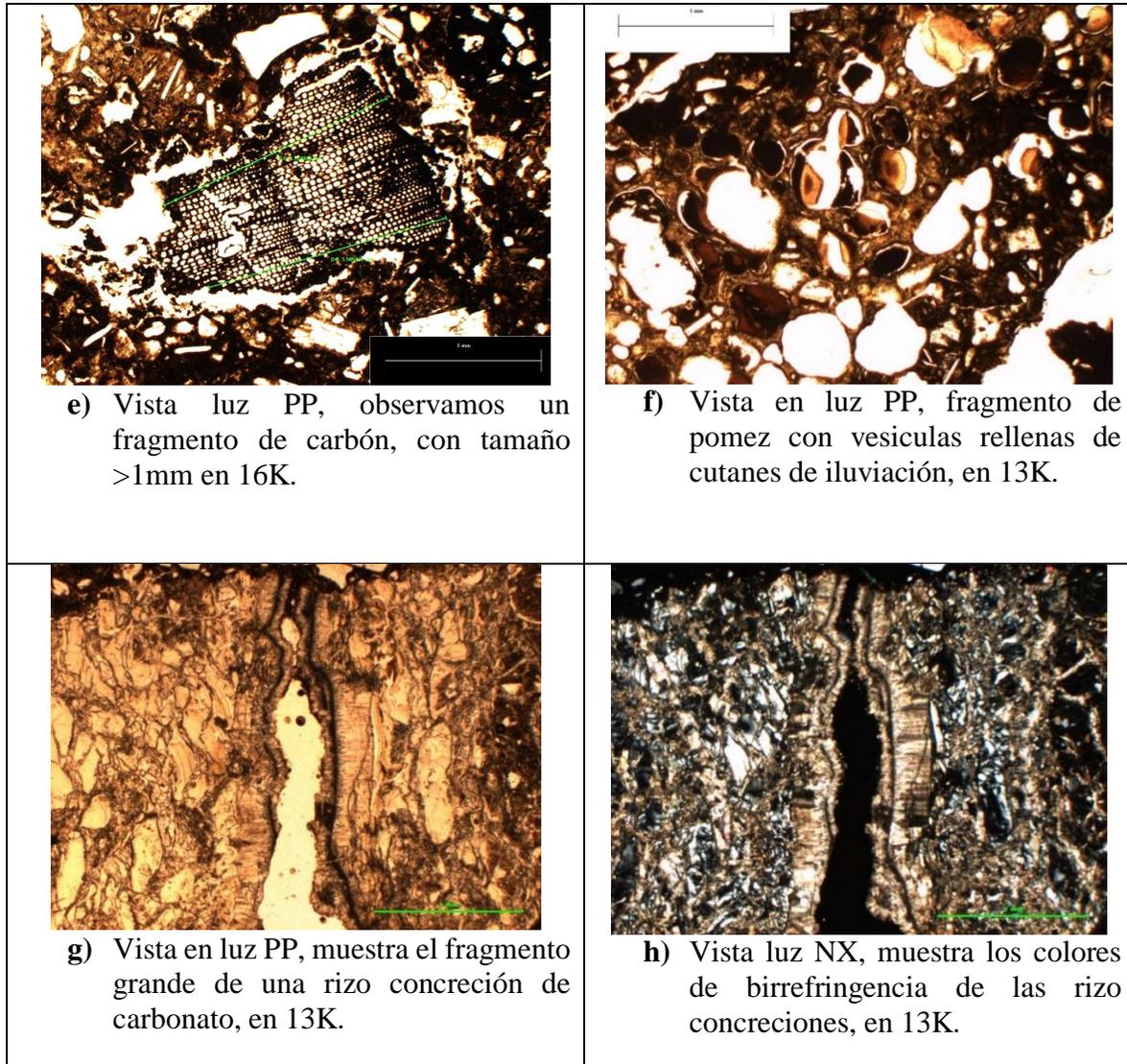


Fig. 40 Fotomicrografías de las muestras con estuco, parte 3, mortero.

5.2 Caracterización física de textura de suelos

Textura

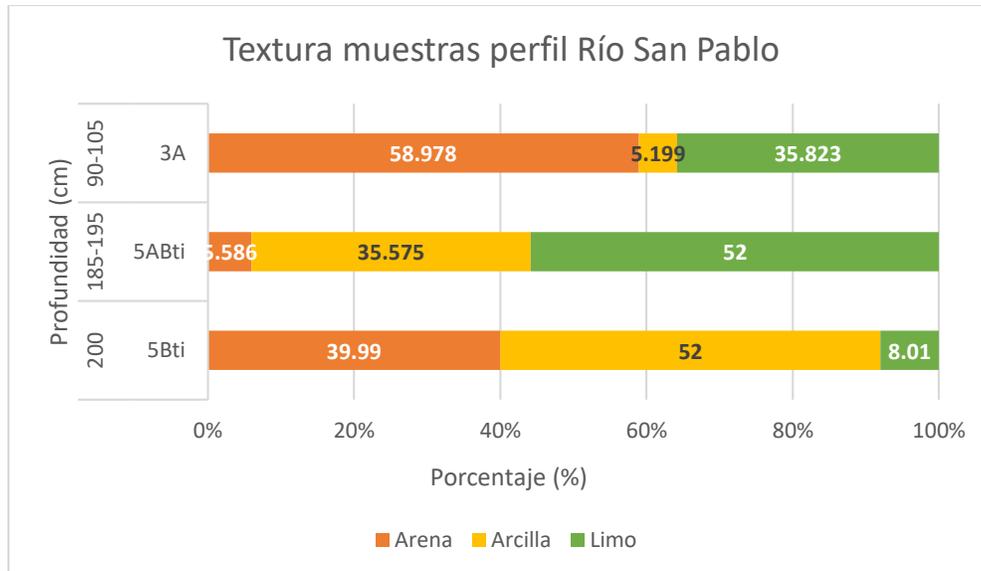


Fig. 41 Textura de horizontes de paleosuelos seleccionados, R.S.P.

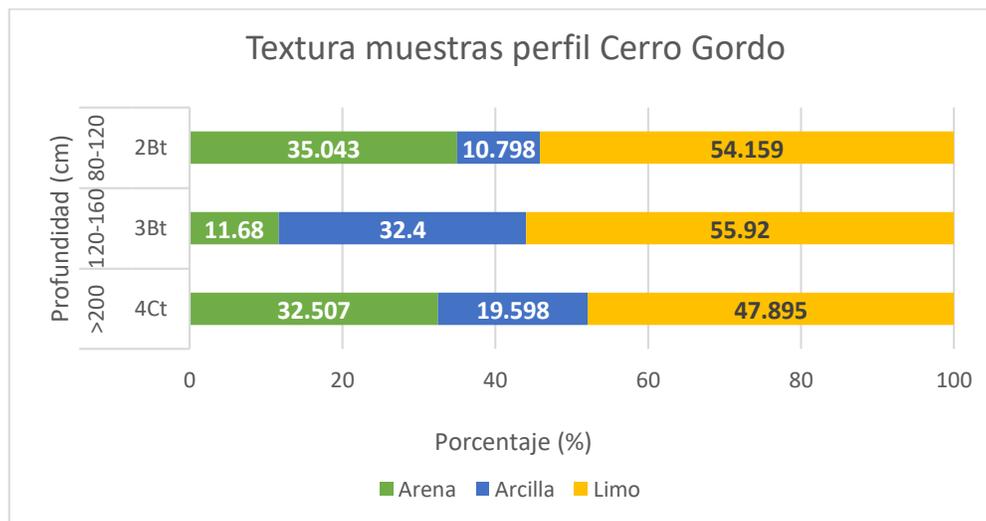


Fig.42 Textura de horizontes de paleosuelos seleccionados, C.G.

La textura de los horizontes seleccionados del perfil Río San Pablo (Fig.41), para la muestra del horizonte 3A, tiene una textura franco-arenosa. La muestra del horizonte 5ABti tiene una textura franca arcillo-limosa y la muestra del horizonte 5Bti tiene una textura arcillosa. Una descripción más detallada de estos horizontes se puede encontrar en Rivera (2009).

Por otro lado, la textura de los horizontes seleccionados del perfil Cerro Gordo (Fig. 42), para el horizonte 2Bt, tiene una textura franco limosa, la muestra del horizonte 3Bt tiene una textura franco-arcillo-limosa y la muestra del horizonte 4Ct tiene una textura franco-limosa.

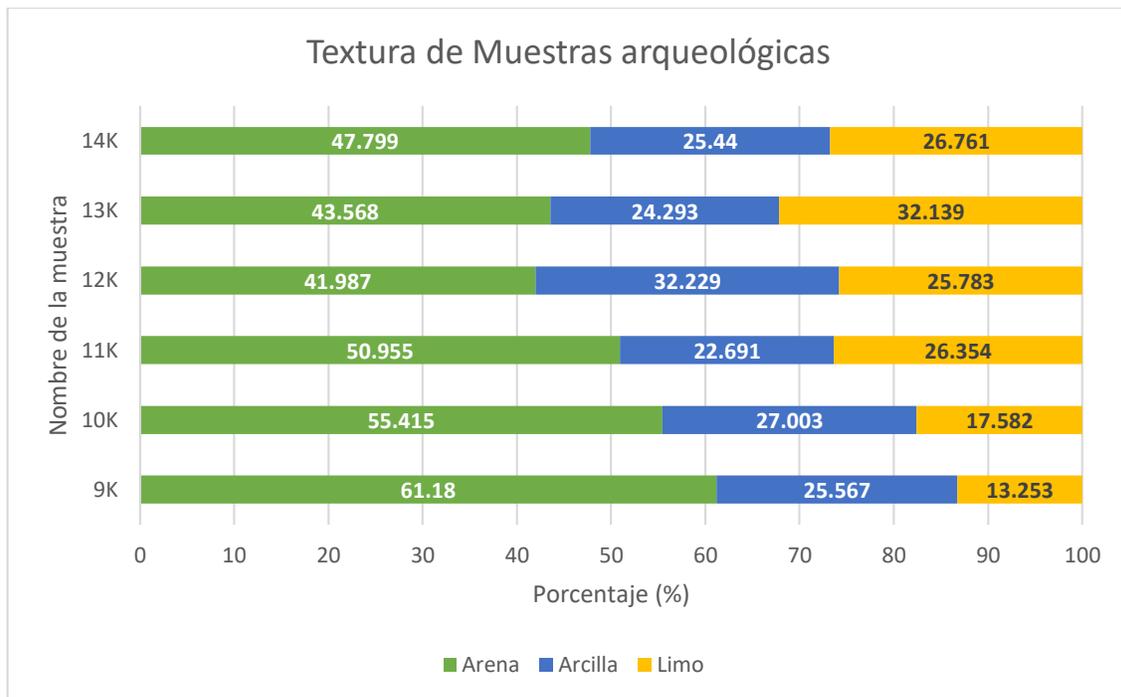


Fig.43 Textura de las muestras arqueológicas, ZMAT.

En general las muestras arqueológicas tienen un alto contenido de arena, sobre todo en la muestra 9K, 10k y 11K, cuentan con un ~50% de su composición de arena y un bajo contenido en limo, aunque las arcillas de igual manera forman un tamaño muy importante. En cuanto a las muestras 14k, 13k y 12K, tienen solo un poco menos del 50% de contenido de arena, pero estas siguen tomando el papel principal en la composición de la muestra (Fig.43).

5.3 Caracterización química de los materiales

5.3.1 pH y conductividad eléctrica

Las muestras naturales tienen valores de pH que van de ligeramente alcalinos a alcalinos (7.19 a 8.44). Los horizontes de suelo con valores neutrales son los correspondientes al paleosuelo RSP (Tabla 2), en tanto que, en Cerro Gordo, todas las muestras tienen pH's alcalinos. En cuanto a la Conductividad eléctrica (CE) se observan valores bajos, excepto en los horizontes carbonatados, del Cerro Gordo, aunque en 4Ct, se nota una disminución.

En general, los resultados de pH de las muestras arqueológicas tienen valores que oscilan de 7.4 a 8.8. Las muestras con los valores más altos son 10, 11 y 13, los cuales indican la presencia del estucado (Fig.44). En cuanto a la CE es baja, exceptuando la muestra 12, la cual tiene valores muy altos, posiblemente debido al contenido de sales o carbonatos. Sin embargo, no hay coincidencia en esta muestra de valores de pH que reflejen dichos contenidos (Fig.45).

Tabla. 2 Valores de pH y CE de las muestras naturales.

Muestra Perfil Rio San Pablo	Profundidad (cm)	pH	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
3- Horizonte 3A	90-105	8.44	147.8
5- Horizonte 5ABti	185-195	7.19	161.2
8- Horizonte 5Bti	>200	7.58	259.2
Muestra Perfil Cerro Gordo			
4- Horizonte 2Bt	0-80	8.44	486.7
6- Horizonte 3Bt	80-160	8.04	484.4
7- Horizonte 4Ct	160-200	8.61	170.7

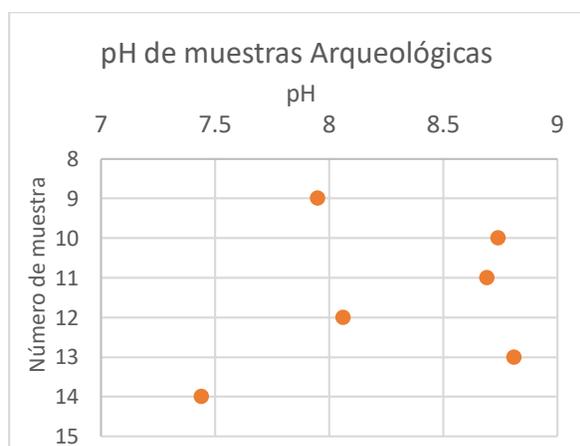


Fig.44 Gráfico de pH, muestras arqueológicas, ZMAT.

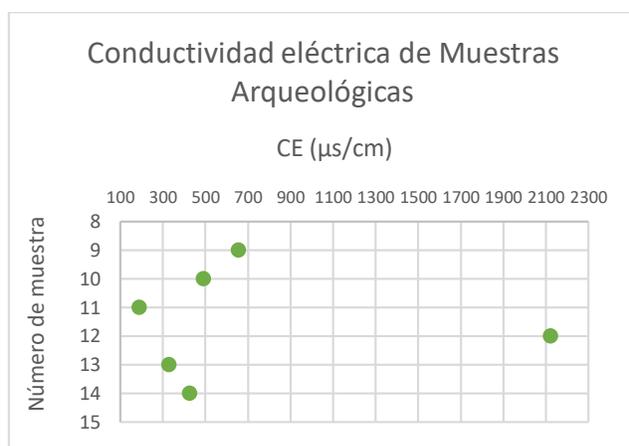


Fig. 45 Gráfico de CE de muestras arqueológicas, ZMAT

5.3.2 Susceptibilidad Magnética

En cuanto a los depósitos de caída de origen volcánico (Muestra 1 y 2), tienen valores que se consideran altos debido al contenido en minerales ferromagnesianos, pero particularmente, los óxidos de hierro tipo magnetita. Sin embargo, los valores más altos se observan en el horizonte 4Ct (Muestra 7) de Cerro Gordo, que muestra tanto su origen volcánico como la influencia de la pedogénesis que forma óxidos de hierro, responsables de la susceptibilidad magnética (Tabla 3). El valor más bajo se encuentra en el horizonte 3A del Perfil Rio San Pablo (Muestra 3).

Por otro lado, en las muestras arqueológicas, el valor más alto está en la muestra 12K, el cual es similar al encontrado en los depósitos volcánicos.

Tabla.3 Valores normalizados de susceptibilidad magnética.

Muestra	Xlf normalizada (m³/kg)	Xhf normalizada (m³/kg)
1 Deposito de caída	0.35	0.33
2 Deposito de caída	0.37	0.33
4-Horizonte 2Bt-CG	0.38	0.37
6- Horizonte 3Bt-CG	0.47	0.45
7-Horizonte 4Ct-CG	0.82	0.80
3-Horizonte 3A-RSP	0.09	0.08
5-Horizonte 5ABti-RSP	0.13	0.12
8-Horizonte 5Bti-RSP	0.10	0.09
9K	0.19	0.18
10K	0.20	0.18
11K	0.13	0.13
12K	0.34	0.32
13K	0.22	0.21
14K	0.19	0.18

Capítulo 6 Discusión de los resultados

6.1 Propiedades físicas y químicas

Para determinar la relación entre las muestras naturales con las arqueológicas, empezaremos con el análisis de las propiedades físicas y químicas estudiadas en este trabajo.

Como se observa en las figuras 41 y 42, tanto los suelos del Cerro Gordo como los de San Pablo, tienen una dominancia de la fracción limo, si bien algunos horizontes son más arcillosos como 5Bti y 5Btk de San Pablo y 2Bt de Cerro Gordo. A diferencia el 3A de San Pablo, sobresale el contenido de arena. En todas las muestras arqueológicas, sin importar el lugar de donde se obtuvieron, las fracciones de arena, limo y arcilla son homogéneas, con un dominio claro de la arena (Fig. 43).

Con respecto al pH los resultados arrojan valores similares, que van de neutros a alcalinos, aunque las muestras con estucos (10K, 11K y 13K), tienen pH's cercanos al 9 (Fig. 44). En el caso de la CE, las muestras 9 y 12 son diferentes a todos los materiales, con valores altos (Fig.45) debido al uso de la cal como materia prima para los acabados.

En cuanto a la susceptibilidad magnética, sus valores nos pueden dar información cualitativa del intemperismo de los materiales. Por ejemplo, en los depósitos volcánicos (Figs. 13 y 14) mientras la coloración sea más rojiza, se sugiere que el material se encuentra más intemperizado o que sufrió hidrotermalismo (Fig.34, h). Lo que se observa en las muestras arqueológicas 9K y 14K, (Figs. 28 y 31) las cuales presentan un mayor contenido de escoria con hidrotermalismo en la composición del mortero.

6.2 Micromorfología

Por su parte, los resultados de la micromorfología denotan claramente, que los materiales arqueológicos tienen una fuerte afinidad con los depósitos volcánicos encontrados en las laderas del Cerro Gordo. En todas las muestras arqueológicas, se observan componentes volcánicos, con esquirlas de vidrio, plagioclasas, fragmentos de roca y fragmentos de pómez. Otro elemento común en los materiales arqueológicos es el suelo. Varios de los rasgos detectados conducen a determinar que la procedencia de este material no es única. Sin embargo, la fuente se encuentra en los alrededores del valle. Por ejemplo, en la muestra 13K Zacuala (Fig.40, d), muestra rasgos similares a los observados en los horizontes del Cerro Gordo, en donde se tienen Luvisoles (Solleiro *et al.*, 2006).

Además, algunas muestras como 16K y 14K, que presentan fragmentos de carbón, agregados con estructura en bloques angulares y una matriz oscura, guardan probablemente una estrecha relación con el Paleosuelo negro del Rio San Pablo, descrito con detalle por Sánchez *et al.*, (2013), que representa el suelo en el que vivieron los teotihuacanos. Ese mismo suelo con los rasgos descritos se encontró, como se ha mencionado, en la pirámide de la Luna Rivera *et al.*, (2007). En adición, otros rasgos que se encontraron presentes en las muestras son carbonatos pedogenéticos como rizo concreciones en 13K, mismas que son observadas por Valera (2016) tanto en Cerro Gordo como en la localidad Maseca (al pie de la Sierra Patlachique –sur del valle), las cuales corroboran el uso de suelo en la elaboración de los aplanados y las paredes de las

edificaciones. Esta muestra (13K) es quizá, la única en la que se observan carbonatos pedogenéticos, además del estuco, lo que le brinda el valor de pH más alto de todos los objetos analizados (Fig. 43).

Cabe señalar que, en las muestras arqueológicas, podemos encontrar carbonatos sintéticos como la cal utilizada para el estucado y naturales como las rizo concreciones, que contrastan en los materiales de construcción y nos brindan información de dos fuentes diferentes de carbonatos.

6.3 Técnicas constructivas

Un rasgo distintivo es la presencia de estuco que solo está presente en muestras como Plaza Luna (10K), Zacuala (13K) y Plaza Oeste (16K). Esta diferencia se puede deber a que las muestras pertenecen a diferentes etapas constructivas y por lo tanto evidencian un cambio en la técnica de construcción o de propósitos diferentes para los estucos. Sin embargo, la muestra 16K pertenece a la etapa constructiva Tlamimilolpa, en la cual se encuentran la mayoría de las muestras que no contienen estucos; por lo que parece ser una pionera de las muestras 10K y 13K, ya que el estuco contiene esquirlas de vidrio más grandes que las observadas en 10K y 13K. Las cuales pertenecen a las etapas constructivas Xolalpa y Metepec respectivamente, donde hay un mayor desarrollo de las técnicas constructivas y se encuentran más muestras con estucado (Fig.8).

En cuanto a la porosidad total de las muestras, nos evidencian la compactación final de las muestras arqueológicas, debido a la técnica de manufactura que se haya realizado para los morteros. En general las muestras tienen un ~20% de porosidad total, aunque la muestra 11K tiene la mayor porosidad de todas las muestras, con un 31.38%. Esto se debe al gran tamaño de los agregados presentes en el mortero. Mientras que la muestra 14K, presenta la menor porosidad de todas, con un 11.04%, debido al tamaño bien seleccionado de los componentes del mortero.

Asimismo, se considera que a pesar de que existen similitudes en los materiales arqueológicos, se tienen diferencias, sobre todo en el tamaño de grano de los materiales usados en su elaboración, y en la forma en que están unidos los distintos fragmentos que componen principalmente al mortero. Algunos de los fragmentos están cementados con suelo fino; en algunos otros se encuentran restos de esquirlas de vidrio entre los contactos de los fragmentos. Sin embargo, hasta el momento, se puede sugerir que el principal aglutinante es el suelo fino con gran contenido de arcillas. Estas diferencias parecen estar relacionadas con las técnicas de manufactura y no con la procedencia del material.

Como es sabido, en los alrededores cercanos a Teotihuacán no hay materiales calcáreos como calizas o conchas que son usados en la fabricación del estuco, el cual es considerado como una caliza sintética (Villaseñor y Aimers, 2009). Sin embargo, las calizas son rocas que se encuentran en regiones cercanas, como en Hidalgo y Puebla. De hecho, las estimaciones hechas por Barba y Córdova (1999) señalan el uso de 5.5×10^5 ton de caliza y 12,200,000 ton de madera para su preparación, usados en los aplanados.

La investigación que se presenta aquí confirma que además de la cal, se usaron suelos tanto agrícolas, como naturales y escoria volcánica. Como previamente había sido planteado por McClung y Barba (2011).

Lo interesante de este estudio es que se ha podido establecer claramente, el uso del suelo negro, denominado por Sánchez *et al.* (2013) como Paleosuelo Negro San Pablo. Si bien el nombre lo toma de la sección tipo, su ocurrencia no se restringe a dicha localidad, ya que su extensión ha sido señalada por los autores mencionados, marcando, inclusive que, en ocasiones, este paleosuelo es exhumado (Sánchez *et al.*, 2013). Adicionalmente, como ya se ha señalado, este paleosuelo no es el único usado en las construcciones teotihuacanas, sino que se observa que los teotihuacanos accedieron a otros recursos del valle de Teotihuacán, como lo son los suelos que se encuentran en las laderas de los cerros.

6.4 Consideraciones para la restauración de la ZMAT

No existe una composición exacta para todos los morteros, ya que ésta ha variado a lo largo de la historia, dependiendo la época en la que se realizaron y las condiciones geográficas. Sin embargo, se sabe que los materiales que han jugado un papel importante para aglutinar los morteros, son principalmente, el lodo, el yeso y la cal (Elsen, 2005).

Actualmente, se sabe que los morteros están constituidos de tres principales componentes, primero, agregados gruesos que le dan resistencia al mortero, segundo, agregados finos que constituyen al aglutinante y por último componentes accidentales. Estos tres materiales pueden formar la masa de los morteros (Stoops *et al.*, 2017).

En el caso de los morteros teotihuacanos podemos observar estos tres componentes, el primero constituido por la escoria volcánica, el segundo, constituido por el suelo arcilloso que generalmente se encuentra uniendo los fragmentos gruesos (Fig. 40, d) y, por último, fragmentos de carbón y carbonatos pedogenéticos, formarían los componentes accidentales (Fig.40, e y g). Los cuales, aunque no se encuentran en gran cantidad, nos permiten determinar el contexto cultural y ambiental en el que vivían los teotihuacanos.

Con respecto al cutan de iluviación observado en la muestra 13K, se encuentra bien preservado (Fig. 40, d). De manera que se infiere que los componentes naturales de donde extraían el suelo tenían un alto grado de estabilidad, para haber desarrollado un cutan de iluviación continuo. Debido a que dicho cutan resistió al proceso de manufactura que usaron los teotihuacanos.

A primera instancia, podríamos proponer que el horizonte 3A del perfil Río San Pablo pudo ser usado como materia prima, pero este horizonte se formó mucho después de que los teotihuacanos vivieron en la zona, ya que su edad es de casi 400 años (Sánchez *et al.*, 2013). Sin embargo, es posible encontrar un contemporáneo que sea muy similar al suelo utilizado para realizar los morteros. Como se mencionó el horizonte 3A del perfil R.S.P y el horizonte 2Bt del perfil Cerro Gordo aún contiene minerales frescos que son similares a los encontrados en la matriz de los morteros, los cuales podrían ser utilizados actualmente para una nueva fabricación de morteros.

Aunque, para los estucados de cal, resulta complicado definir fuentes exactas de procedencia. Se puede afirmar que la preparación de la cal llevaba un componente adicional que es el vidrio volcánico, presente en forma de esquirilas de vidrio muy fino, posiblemente tamaño

arcilla, las cuales se pueden observar en las muestras 10K, 13K y 16K (Fig.38, a, b, c), lo cual brinda una mayor resistencia y dureza al estucado.

Finalmente, a partir de los hallazgos encontrados, aceptamos la hipótesis generada, que establece que los materiales geológicos utilizados para la creación de los estucos y morteros, que encontramos en la ZMAT, pertenecen en su mayoría al valle de Teotihuacán y las zonas circundantes. Por lo tanto, aunque no es posible restaurar toda la ZMAT con los componentes exactos que usaron sus antiguos pobladores, si es posible usar materiales muy similares a los empleados en su construcción, que aún guardan relaciones estrechas con los procesos que afectaron el Valle de Teotihuacán y que servirán como materiales para la restauración y preservación de los monumentos arquitectónicos.

Estos resultados guardan relación con lo que sostiene Rivera *et al.* (2007) quienes documentan la presencia de suelo en los taludes de los diversos edificios que conforman la pirámide de la Luna, así como su uso como material de relleno en la pirámide del Sol (Barba, 1995).

Conclusión

Gracias al estudio micromorfológico principalmente, se pudo establecer no solo una relación entre el uso de suelos agrícolas y escorias, sino también del propio suelo Teotihuacano (**PNSP**) como materiales de construcción, gracias a los rasgos similares encontrados, como la presencia de carbón. Además de establecer que los suelos arcillosos como tepetates, son los principales cementantes de las muestras arqueológicas y en específico de los morteros.

En adición, existen aún interrogantes en cuanto a la procedencia de la cal sintética que contienen los estucos, pero para los objetivos de esta investigación no fue posible determinar este problema. Sin embargo, si fue posible identificar cuáles son los componentes principales que conforman el estuco que no sólo es la cal, sino también, una mezcla de esquirlas de vidrio de tamaños muy cuidados para su elaboración.

Finalmente, las técnicas como, análisis de textura, pH, CE, susceptibilidad magnética y porosidad, junto con la Micromorfología complementaron la interpretación de los materiales y nos permiten vislumbrar un panorama general de las cantidades y procedencias de la materia prima utilizada para su elaboración; como es el caso de la textura, la cual permitirá utilizar los porcentajes correctos de los distintos tamaños de partículas (arena, limo y arcilla) que contienen las muestras, con la posibilidad de elegir hoy en día, materiales muy parecidos a los que los antiguos pobladores usaron. De tal manera que los resultados presentados se constituyen como una vía para posibles restauraciones de acabados decorativos de estructuras arqueológicas de la ZMAT, sin perder totalmente su valor arquitectónico y de autenticidad, respetando así los criterios de intervención como compatibilidad y reversibilidad.

Bibliografía

- Agnieszka, L. (2016). *Why stucco? The importance of Stucco Decorations for Christian Communities of the Gulf in the Early Islamic Period*. Obtenido de Le carnet de la MAFKF, Recherches archéologiques franco-koweïtiennes de l'île de Faïlaka (Koweït): <https://mafkf.hypotheses.org/1506>
- Alfaro, R. L. (2015). *Plan de Conservación Integral para el Conjunto Arqueológico Plaza Oeste, ZMAT. (Tesis de maestría)*. UAM. México, D.F.
- Al-Janabi. (1983). *Islamic Archaeology in Iraq: Recent excavations at Samarra*. (T. a. Francis, Ed.) *World Archaeology*, 14(3), 305-327.
- Barba L. (1995). *El impacto en la paleogeografía de Teotihuacán. (Tesis Doctoral)* Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México, D.F.
- Barba de Piña Chán, B. (1980). *Tlapacoya. Los principios de la tocracia en la Cuenca de México*. Toluca, México. FONAPAS.
- Barba, L. (2005). *Materiales, técnicas y energía en la construcción de Teotihuacán. En Arquitectura y urbanismo: pasado y presente de los espacios en Teotihuacán; Memoria de la Tercera Mesa Redonda de Teotihuacán*. (Primera edición ed., págs. 211-221). México: INAH.
- Barba, L., Ortiz, A., Link, K., López, L., Lazos, L. (1996). *Chemical analysis of Residues in Floors and the Reconstruction of Ritual Activities at the Templo Mayor, Mexico*. En M. V. Orna (Ed.), *Archaeological Chemistry* (Vol. 625, págs. 139-156). Washington, D.C., United States of America: En Orna, V. *Archaeological chemistry*. Obtenido de <http://www.mesoweb.com/about/articles/Residues.pdf>
- Barba, L., y Córdova, J. (1999). Estudios energéticos de la producción de cal en tiempos teotihuacanos y sus implicaciones. *Latin American Antiquity*, 10(2), 168-179.
- Barba, L. y Villaseñor, I. (2013). La cal. Historia Propiedades y usos. *UNAM-IIA y Asociación Nacional de Fabricantes de la Cal, A.C. México*.
- Cano G. A. (2017). *Manual de prácticas de la materia de Edafología*. Obtenido de utselva.edu.mx: www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf
- Dasen, V. (1993). *Dwarfs in Ancient Egypt and Greece*. En *Monographs on Classical Archaeology*. Oxford, Clarendon.
- Elert, K. Rodríguez, C. Pardo, E. Hansen, E. Cazalla, O. (2002). Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings. *Maney Publishing, International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works*, 47(1), 62-75.
- Elsen J. (2006). Microscopy of historic mortars- a review. *ELSEVIER*, 36, 1416-1424.
- Evans. E. y Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism*. Massachusetts, U.S.A. Academic Press.

- Flores, L. y Alcalá, R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. México, D.F. Instituto de Geología, UNAM.
- Gama, J., Solleiro E., McClung, E., Villalpando, J., Sedov, S., Jasso Castañeda, C.; Palacios Mayorga, S., Hernández, D. (2005). Contribuciones de la ciencia del suelo a la investigación arqueológica: El caso de Teotihuacán. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 1-11. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57323101.pdf>
- García, E. (1968). *Clima actual de Teotihuacán: Materiales para Arqueología de Teotihuacán*. INAH, México, 9-28.
- García, A., Macías, J., Tolson, G., Valdez, G. y Mora, J. (2002). Volcanic stratigraphy and geological evolution of the apan region, east-central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Geofísica International*, 41(2), 133-150.
- Hammond, N., Gerhardt, J., Y Donaghey, S. (1991). *Stratigraphy and Chronology in the reconstruction of Preclassic developments at Cuello*. En N. Hammond, *Early Maya Community in Belize* (págs. 23-69). Cambridge University.
- Hernandez, J. (2007). *Geología y Geomorfología volcánica de la región de los yacimientos de obsidiana de Otumba en el sector Norte de la Sierra Nevada de México*. México, D.F.: Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Hueda, Y., Soler, A., Urrutia, J., Barba, L., Manzanilla, L., Rebolledo, M. y Gogutchiaichvili, A. (2004). Archaeomagnetic studies in central Mexico - dating of Mesoamerican lime-plasters. *ELSEVIER*, 147, 269-283.
- Loaiza, J., Stoops, Poch y Casamitjana (2015). *Manual de Micromorfología de suelos y técnicas complementarias*. Medellín, Colombia: Pascual Bravo.
- López, J. (1991). *La estrategia de la pirámide de Cuicuilco en retrospectiva*. Instituto Nacional de Antropología e Historia, 35-46.
- Lounejeva, E., Morales P., Cabadas H., Cienfuegos E., Sedov S., Vallejo E., Solleiro E. (2006). Late Pleistocene to Holocene environmental changes from $\delta^{13}C$ determinations in soils at Teotihuacán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 85-98.
- Manguin, P. y Indrajaya, A. (2006). *The archaeology of Batujava (West Java, Indonesia): an interim report*. En E. G. Bacus, *Uncovering Southeast Asia's Past. Selected papers from the 10th International Conference of the European Association of Southeast Asian Archaeologists* (págs. 245-257). Singapore: Nus.
- Manzanilla, L. (2004). *Metodología interdisciplinaria para el estudio de las áreas de actividad y cambios en el uso de recursos en Teotihuacán*. En Benavides A., Manzanilla L., y Mirambell L., *Homenaje a Jaime Litvak* (págs. 81-97). México: Serie Arqueología, INAH, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM.

- McClung, E., y Barba, L. (2011). Ciencias aplicadas al estudio de estructuras monumentales en Teotihuacan, México. *Archaeological Practice: A Journal of the Society for American Archaeology.*, 19-28.
- McClung, E., Solleiro E., Gama J., Villalpandp J., Sergey S. (2003). Paleosols in the Teotihuacan valley, Mexico: evidence for paleoenvironment and human impact. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), 270-282.
- Millon, R. (1973). *Urbanization at Teotihuacan, Mexico* (Vol. Volume 1: The Teotihuacan Map.). Austin: Universitu of Texas.
- Murakami , T., Hodgins, G., Simon, A. (2013). Characterization of lime carbonates in plasters from Teotihuacan, Mexico: preliminary results of cathodoluminescence and carbon isotope analyses. *Journal of Archaeological Science*, 40, 960-970.
- Rivas, J., Ortega B., Solleiro E. y Sergey S. (2006). Rock magnetism and pedogenetic processes in Luvisol profiles: Examples form Central Rusia and Central Mexico. *Quaternary International*, 212-223.
- Rivera, Y. (2009). *Impacto del desarrollo cultural prehispánico en la cubierta edáfica del Valle de Teotihuacan (Tesis de maestría)*. UNAM. México, D.F.
- Rivera, Y., Sergey S., Solleiro E., Pérez J., McClung E., González A. y Gama J. (2007). Degradación ambiental en el valle Teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(2), 203-217.
- Rodriguez, C. (2005). Morteros como elementos de estudio en arqueología-arqueometría medieval. *Grupo de Investigación RNM 179 de la Junta de Andalucía*, 170-192.
- Rzedowski, G. de Rzedowski J. y colaboradores (2010). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Edición digital. Instituto de Ecología y CONABIO, Pátzcuaro (Michoacán), 983 p.
- Sánchez, S. (2015). *Los palosuelos "negros" como indicadores de cambios ambientales naturales e inducidos por el hombre en el periodo de ocupación Teotihuacano.(Tesis Doctoral)*. UNAM. México, D.F.
- Sánchez, S., Solleiro E., Sedov S., McClung E., Golyeva A., Prado B., Ibarra E. (2013). The Black San Pablo Paleosol of the Teotihuacan Valley, Mexico: Pedogenesis, Fertility, and use in Ancient Agricultural and Urban Systems. *Geoarchaeology: An International Journal*, 1-19.
- Schávelzon, D. (2017). *Viollet-Le-Duc y la restauración arqueológica en el Valle de México: una revisión*. Conversaciones con Eugéne Viollet-Le-Duc y Prosper Mérimée, 221-232.
- Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas Escala 1:250,000*. Obtenido de http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed.jsp

- Sraulino, L., Sedov S., Michelet D., Balanzario S. (2013). Weathering of carbonate materials in ancient Maya constructions (Río Bec and Dzibanché: Limestone and stucco deterioration patterns). *Quaternary International*, 315, 89-100.
- Soler, A., Sánchez, F., Rodríguez, M., Caballero, C., Goguitchaishvili, A., Urrutia, J., Manzanilla, L., Tarling, D. (2006). Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. *Earth Planets Space*, 58, 1-7.
- Solleiro, E., Sycheva S., Sedov S., McClung E., Rivera Y., Berkovich C., Kuznetsova A. (2010). Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes. *ELSEVIER, Quaternary International*, 1-13.
- Solleiro, E., Sedov S., Sycheva S., Sánchez S., Pustovoitov K., Sauer D., (2015). Influencia de los paleosuelos en los procesos exógenos modernos en la porción noreste de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 255-272.
- Solleiro, E., Sedov S., McClung E., Cabadas H., Gama J., Vallejo E. (2006). Spatial variability of environment change in the Teotihuacan Valley during the Late Quaternary: Paleopedological inferences. *Quaternary International*, 13-31.
- Stoops, G., Canti, M. y Kapur, S. (2017). Calcareous Mortars, Plasters and floors. En C. y. Nicosia (Ed.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*. UK: Wiley Blackwell.
- Sraulino, L., Sedov S., Michelet D., Balanzario S. (2013). Weathering of carbonate materials in ancient Maya constructions (Río Bec and Dzibanché): Limestone and stucco deterioration patterns. *Quaternary International*, 89-100.
- Tapia, G., y López J. (2001). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 50-65. Obtenido de [http://satori.geociencias.unam.mx/19-1/\(5\)Tapia.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/19-1/(5)Tapia.pdf)
- Valera, D. (2016). *Carbonatos pedogenéticos en el Valle de Teotihuacán como indicadores paleoambientales. (Tesis de Maestría)*. UNAM.Ciudad de México.
- Vazquez, E. y Jaimes R. (1989). Geología de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28, 133-189.
- Villaseñor, I. y Aimers, J. (2009). Una de cal por las que van de arena: un estudio diacrónico de los estucos de Clakmul y Palenque. En *Estudios de la cultura Maya XXIII* (págs. 25-50). Instituto de Investigaciones Filológicas, UNAM.