



## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

### **EVOLUCIÓN DE LA CUBIERTA EDÁFICA EN EL VALLE BUDSILHÁ, CHIAPAS: INFLUENCIA DE LOS FACTORES FORMADORES Y LAS ACTIVIDADES HUMANAS PRE-HISPÁNICAS**

#### **TESIS**

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

PRESENTA:

**KARLA ANDREA GUILLÉN DOMÍNGUEZ**

#### **DIRECTORA DE TESIS:**

DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO  
Instituto de Geología, UNAM

#### **COMITÉ TUTORAL:**

DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO  
Instituto de Geología, UNAM

DR. SERGEY SEDOV

Instituto de Geología, UNAM

DR. CHARLES GOLDEN

Brandeis University

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., septiembre 2020.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

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

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra, por brindarme los recursos financieros y al Instituto de Geología por formarme en sus aulas, laboratorios, prácticas de campo, seminarios y congresos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por otorgarme una beca la cual me permitió seguir realizando mis estudios de maestría. Al proyecto PAPIIT-105819 a cargo del Dr. S. Sedov y al Proyecto Arqueológico Chicolá-Busiljá, dirigido por el Dr. Charles Golden, por los recursos necesarios para realizar los análisis durante este proyecto de investigación.

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 mi jurado, Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Dr. Sergey Sedov, Dr. Charles Golden, Dr. Rafael Antonio López Martínez y Dra. Lucy Natividad Mora Peña, por tomarse el tiempo de leer este texto y realizar sus revisiones.

Agradezco el apoyo de los investigadores y técnicos del Instituto de Geología: M. en C. de la Tierra Jaime Díaz Ortega, del Taller de laminación de Suelos, del Laboratorio de Paleosuelos; Biol. René Alcalá Martínez, del laboratorio de Física de suelos; Dr. Mario Villalobos Peñalosa y el M. en C. Arturo Mendoza Flores, del Laboratorio de Geoquímica Ambiental; Dra. Pi Puig del Laboratorio de Difracción de Rayos X; Dr. Bruno Chávez y la Mtra. Ofelia Beltrán del Laboratorio de Biogeoquímica y Materia Orgánica del Suelo, quienes me facilitaron realizar los análisis necesarios para este proyecto. A la Dra. María Yazmín Rivera Uria quien apoyó en el análisis de los resultados de iones mayoritarios.

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

A mis maestros, quienes me brindaron los conocimientos más valiosos para desarrollarme intelectualmente e inculcarme el gusto por el estudio de este maravilloso mundo en que vivimos.

A mi familia, en especial a mi mamá, Paula, quien siempre ha hecho todo lo posible por brindarme los recursos necesarios, para seguir estudiando.

A mi mejor amigo y compañero de vida, Armando, quien con toda la paciencia y amor que me tiene, me ha acompañado en mi desarrollo personal y profesional.

A mis amigos que me escucharon y apoyaron durante mis estudios de maestría, Bere, Sol, Fer, Paola, Ariana, Laura, son grandes personas los adoro.

<b>Índice</b>	<b>Página</b>
Índice de figuras	4
Índice de tablas	6
<b>Resumen</b>	7
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	8
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Justificación	10
1.3 Hipótesis	11
1.4 Objetivos	11
<b>Capítulo 2 Marco Teórico</b>	
2.1 El Karst y sus principales geoformas	12
2.2 El Karst en México	16
2.3 Suelos tropicales del sur-este mexicano	17
2.4 Tierras bajas Mayas	19
<b>Capítulo 3 Área en estudio</b>	
3.1 Ubicación	21
3.2 Geología y geomorfología del sur-este del estado de Chiapas	22
3.3 Clima	24
3.4 Vegetación	25
<b>Capítulo 4 Metodología</b>	
4.1 Trabajo de campo	26
4.2 Perfiles de suelo estudiados	27
4.3 Preparación de las muestras	27
4.4 Parámetros fisicoquímicos	29
4.4.1 pH	29
4.4.2 Conductividad Eléctrica (C.E.)	29
4.4.3 Pruebas de fertilidad en suelos	29
4.4.4 Cromatografía Iónica	30
4.5 Análisis Granulométrico	31
4.6 Micromorfología de suelos	32
4.7 Análisis micromorfológico	33
4.8 Difracción de Rayos X	33
<b>Capítulo 5 Resultados</b>	
5.1 Descripción de los perfiles de suelo	34
5.1.1 Grupo A) Rancho María	34
5.1.2 Grupo B) Budsilhá	37
5.1.3 Grupo C) Cantera Nueva Esperanza	41
5.2 Análisis micromorfológico	51
5.3 Resultados Analíticos	63
5.4 Granulometría	68

5.5 Pruebas de fertilidad	72
5.6 Mineralogía de la fracción arcilla	73
5.7 Iones mayoritarios	75
<b>Capítulo 6 Discusión y análisis de los resultados</b>	
6.1 Génesis de los suelos de la región	77
6.2 Evolución de los suelos en el Valle Budsilhá	82
6.3 Efectos antrópicos en los suelos	85
6.4 Génesis de los suelos con presencia de yeso: impacto antrópico o influencia local de las aguas freáticas	86
<b>Capítulo 7 Conclusiones</b>	89
<b>Bibliografía</b>	91

---

<b>Índice de figuras</b>		
<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	<i>Proceso de karstificación, en Stokes et al., 2010</i>	12
2	<i>Evolución de un paisaje kárstico tropical, en Bautista et al. (2005), modificado.</i>	13
3	<i>Geoformas cerradas y sus escalas, en White (1988), modificado.</i>	14
4	<i>Cockpit Country, Jamaica, Fuente: Google Earth (2019).</i>	14
5	<i>Cockpits, Budsilhá, Chiapas, México, Fuente: Google Earth (2019).</i>	14
6	<i>Unidades del paisaje kárstico y sus límites, en Stokes et al., 2010, modificado.</i>	15
7	<i>Karst en México, en Espinasa, (2007).</i>	16
8	<i>Distribución de las Tierras Mayas, en rojo las Tierras bajas Mayas del sur, en: Solís (2016), modificado.</i>	19
9	<i>Sureste mexicano, área de estudio en recuadro rojo. Mapa elaborado por Golden et al., (2019), modificado. Mapa elaborado por Golden et al., (2019) modificado</i>	21
10	<i>Vista general del área de estudio, se muestran los sitios estudiados en las Tierras bajas Mayas, al Noroeste el Perfil Bonfil (rosa), al centro Valle Budsilhá (Verde), y al sureste Lacanjá Tzeltal (Amarillo), Fuente Google Earth, 2019. rea de estudio en 2019. Mapa elaborado por Golden et al., (2019), modificado</i>	22
11	<i>Geología regional del estado de Chiapas, recuadro rojo se observa el área de estudio Budsilhá, mapa disponible en Seccombe y Giroux 2011.</i>	23
12	<i>Carta climática del estado de Chiapas, fuente: INEGI 2017</i>	24
13	<i>Vegetación Valle Busijá, fotografía propia.</i>	25
14	<i>Bosque templado perennifolio, fotografía Jaime Díaz.</i>	25
15	<i>Trabajo de campo, temporada 2019.</i>	26

16	<i>Ubicación de los perfiles realizados en el Valle Budsilhá, Temporadas 2018 y 2019, A) Grupo María, B) Grupo Budsilhá, C) Grupo Cantera Nueva Esperanza, Fuente Google Earth 2019.</i>	27
17	<i>Perfil María en una bolsa kárstica</i>	35
18	<i>Perfil Pantano María, representa el tipo de suelo ubicado en el humedal, dentro del mismo rancho.</i>	36
19	<i>Perfil Yeso 1, Valle Budsilhá</i>	37
20	<i>Perfil Yeso 2 en el Valle Budsilhá.</i>	38
21	<i>Ped del horizonte Cg, muestra cristales de yeso</i>	38
22	<i>Posición del Perfil Ladera Budsilhá</i>	39
23	<i>Perfil ladera Budsilhá.</i>	39
24	<i>Perfil Pantano Budsilhá</i>	40
25	<i>Cantera Nueva Esperanza, muestra los rellenos 1 y 2 encontrados en bolsas kársticas.</i>	41
26	<i>Relleno 1 en la Cantera Nueva Esperanza.</i>	42
27	<i>Relleno 2 en la Cantera Nueva Esperanza.</i>	42
28	<i>Perfil 1 sobre caliza saprolitizada, en la Cantera Nueva Esperanza.</i>	43
29	<i>Perfil 2 sobre caliza, en la Cantera Nueva Esperanza.</i>	44
30	<i>Perfil 3, sobre la loma de la Cantera Nueva Esperanza.</i>	45
31	<i>Ubicación del perfil Bonfil</i>	46
32	<i>Perfil Bonfil</i>	47
33	<i>Fragmento de cerámica en el horizonte 2A</i>	47
34	<i>Localización del sitio arqueológico Sak' Tzil,</i>	48
35	<i>Perfil Sak-1, dentro del sitio arqueológico Sak Tzil en la orilla del río</i>	49
36	<i>Perfil Sak-2 Operación arqueológica 7A</i>	50
37	<i>Micromorfología del perfil María</i>	51-52
38	<i>Micromorfología del perfil Pantano María</i>	52-53
39	<i>Micromorfología del perfil Ladera Budsilhá.</i>	54
40	<i>Micromorfología del perfil Pantano</i>	55
41	<i>Micromorfología del perfil Yeso 1 Valle Budsilhá.</i>	56
42	<i>Micromorfología del perfil Yeso</i>	57
43	<i>Micromorfología del Perfil 1 Cantera Nueva Esperanza</i>	58
44	<i>Micromorfología de los Rellenos 1 y 2</i>	59
45	<i>Micromorfología del perfil Bonfil</i>	60
46	<i>Micromorfología del perfil Sak - 1</i>	61
47	<i>Micromorfología de Operación-7A</i>	62
48	<i>pH y C.E. del Perfil María</i>	63
49	<i>pH y C.E del Perfil Pantano María</i>	63

50	<i>pH y C.E., Yeso 1, Valle Budsilhá, 2018</i>	64
51	<i>pH y C.E. Perfil Yeso-2, Valle Budsilhá, 2019</i>	64
52	<i>pH y C.E. del perfil Ladera Budsilhá.</i>	65
53	<i>pH y C.E. Perfil 1, Cantera Nueva Esperanza</i>	65
54	<i>pH y C.E. Perfil 3, Cantera Nueva Esperanza</i>	66
55	<i>pH y CE del perfil Bonfil</i>	66
56	<i>pH y CE del perfil Operación 7A</i>	67
57	<i>Granulometría del perfil María</i>	68
58	<i>Granulometría del perfil Pantano María</i>	68
59	<i>Granulometría del perfil Yeso 1</i>	69
60	<i>Granulometría del perfil Yeso 2</i>	69
61	<i>Granulometría del Perfil 1 Cantera</i>	70
62	<i>Granulometría del Perfil 3</i>	70
63	<i>Granulometría del perfil Bonfil</i>	71
64	<i>Granulometría Operación 7A</i>	71
65	<i>Iones mayoritarios en muestras de agua</i>	76
66	<i>Pedodiversidad en el Valle Budsilhá</i>	82
67	<i>Etapa 1 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá</i>	83
68	<i>Etapa 2 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá, Ocupación Pre-hispánica</i>	84
69	<i>Etapa 3 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá, abandono y revegetación</i>	84
70	<i>Etapa 4 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá, desarrollo actual.</i>	84

---

### Índice de tablas

Número de tabla	Descripción	Página
1	<i>Perfiles de suelo estudiados durante las temporadas 2018 y 2019</i>	23
2	<i>Clasificación de algunas arcillas minerales, de acuerdo al Sistema de clasificación de Dana (1997), modificado</i>	28
3	<i>Propiedades selectas analizadas para evaluar la fertilidad de los suelos</i>	68
4	<i>Mineralogía de arcilla de horizontes minerales</i>	69
5	<i>Difractogramas de la mineralogía de arcilla</i>	70
6	<i>Resultados del análisis por cromatografía iónica</i>	71
7	<i>Balance de cargas</i>	71

## Resumen

La formación de suelo en paisajes kársticos, “compite” con los procesos de karstificación, los cuales promueven la remoción de la cubierta edáfica superficial, rellenando las depresiones kársticas con pedosedimentos, debido a que dicho paisaje, es formado por la disolución de rocas solubles como calizas, o yesos. De esta manera, en este trabajo se realiza un estudio de suelos y pedosedimentos con el objetivo de conocer su evolución y desarrollo, asociados al *karst* tropical de montaña, del Valle Budsilhá, en el estado de Chiapas. Asimismo, documentar los impactos en los suelos con evidencia de ocupación humana prehispánica, ya que la zona de estudio se encuentra en las Tierras Bajas Mayas, las cuales fueron densamente ocupadas durante el periodo Clásico. El estudio de suelos y pedosedimentos se realizó siguiendo una metodología que consistió en dos temporadas de campo, describiéndose 14 perfiles de suelo, realizando pequeñas catenas en la zona. Mientras que, el trabajo de laboratorio consistió en análisis de micromorfología, pH, conductividad eléctrica, fertilidad, difracción de rayos X, entre otras.

Los resultados permitieron categorizar los factores formadores de suelo que tienen mayor impacto en la zona, siendo el principal la posición en el relieve, que ha dado paso a una erosión diferencial en los suelos, influenciada también por el clima, desarrollando suelos como Leptosoles, Luvisoles y rellenos de bolsas kársticas en las pequeñas colinas y lomas. Mientras que, en las posiciones más bajas, se encontraron suelos hidromórficos, como Gleysoles, de los cuales, solo dos perfiles presentaron neoformaciones de cristales de yeso. La presencia de yeso, se asoció, principalmente al alto contenido de sulfatos de calcio, en las aguas freáticas.

De esta manera, tanto las bolsas kársticas como algunas terrazas aluviales, guardan una estrecha relación con la influencia antrópica pre-hispánica. Aunque, algunos perfiles cercanos a las zonas arqueológicas presentaron fragmentos de cerámica y carbón, asociados a fragmentos de suelos rojos, subredondeados, testigos de una erosión diferencial en la zona, conservando solo vestigios de una cubierta edáfica distinta a la que se observa hoy en día, Estos relictos modifican las características de los suelos, proporcionándoles un mayor contenido de la fracción arcilla en algunos horizontes; así como valores bajos en los parámetros de fertilidad.

Finalmente, la evolución de los suelos estudiados, ha sido modificada con el paso de los años, dependiendo el uso que se les ha dado. Sin embargo, actualmente los suelos y los vestigios arqueológicos, se han visto más afectados por la deforestación y el uso de las rocas y suelos, como bancos de materiales para las construcciones de las localidades cercanas. Conservando solo en las depresiones como bolsas kársticas y en los sitios de difícil acceso, vestigios de los suelos antiguos, así como de la cultura Maya que habitó la zona

## **Capítulo 1 Introducción**

La formación de suelos sobre calizas ha sido ampliamente debatido debido a que, en general, los productos de disolución de las calizas son bicarbonatos, los cuales no aportan un gran porcentaje de residuo sólido, del cual se forma el suelo. Sin embargo, es notorio que la cubierta edáfica desarrollada sobre rocas calcáreas integra un conjunto de suelos arcillosos, ricos en materia orgánica, pero de escaso espesor (Leptosoles réndzicos), que contrasta con suelos de coloraciones rojizas, arcillosos y profundos, denominados como *Terra Rossa* (White, 1988; Yaalon, 1997). Este último tipo de suelos, son en general Luvisoles, los cuales han sido estudiados por diversos distintos autores como, Cabadas et al., (2010); Das y Das, Evan y Lawrence, 2013; Estrada *et al.*, 2019, quienes han estudiado la procedencia del material parental de estos suelos, el cual, en general, es una mezcla de materiales volcánicos, así como sedimentos marinos, y polvos transportados por el viento, combinados con los residuos de la roca caliza. Sin embargo, aún no es completamente clara la génesis de dichos suelos.

Además, la formación del suelo en los paisajes kársticos es escasa en algunas zonas, ya que, “compite” con el proceso de *karstificación*, el cual promueve la remoción de la cubierta edáfica superficial, rellenando las depresiones *kársticas* con pedosedimentos, de las zonas superiores. Estas depresiones se forman por la disolución de rocas solubles como, calizas, dolomías, evaporitas, como sal y yeso. En México, existen 391 700 km<sup>2</sup> de paisajes kársticos (Gunn, 2004, en Estrada et al., 2019) de los cuales 35 000km<sup>2</sup> corresponden al *karst* del estado de Yucatán (Kueny y Day, 2002). Otras áreas con paisajes kársticos en México se localizan en las zonas montañosas de Chiapas, la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental (Gutierrez, 2008, en Estrada *et al.*, 2019).

De esta manera, el paisaje *kárstico* de la Sierra Madre de Chiapas (SMC), está constituido por calizas del Mesozoico al Paleógeno y fuertemente plegadas durante la Orogenia Chiapaneca del Mioceno, lo que ha dado lugar a un conjunto de pliegues orientados NW-SE (Burkart, 1983; Moran *et al.* 1984). Sobre esta geoforma calcárea se ha desarrollado un sistema *kárstico* y una cubierta de suelos constituida por Leptosoles, Gleysoles, Luvisoles, Cambisoles y Vertisoles, asociados con Nitisoles y Arenosoles (INEGI 2017; Bautista *et al.*, 2011). Sin embargo, parte de esa cubierta edáfica se ha perdido por procesos antrópicos (tanto en el pasado como en la época actual) y de *karstificación*, de manera que, parcialmente, el registro pedológico y arqueológico se puede encontrar en las depresiones *kársticas*.

Por consiguiente, este trabajo de investigación contempla el estudio de los suelos y la búsqueda de dichos pedosedimentos, para conocer su desarrollo y evolución, asociados al *karst* tropical de montaña, del Valle Budsilhá (Chiapas) y sus alrededores. Así como, documentar los cambios en los suelos con evidencia de ocupación humana pre-hispánica, ya que, la zona de estudio se encuentra en las Tierras Bajas Mayas, las cuales tuvieron su auge durante el periodo clásico Maya (250 – 900 d.C.) (Lampe, 2016; Coe, 1999; Foias, 2014). Uno de los trabajos más completos realizados en las Tierras bajas Mayas, fue realizado por Aliphath (1994), quien encontró que un tercio de dicha zona, se encuentra representada por suelos poco profundos, pero fértiles y bien drenados, los cuales en general son Leptosoles, Litosoles y Luvisoles. Posteriormente, se encuentran Gleysoles, Cambisoles, Nitisoles y por último Fluvisoles.

Por lo tanto, el estudio de los suelos es una componente integral de los paisajes culturales y pueden proporcionar información importante para los estudios arqueológicos. Esto puede incluir el impacto en un sitio y el entorno ambiental en el momento de la ocupación humana (Holliday, 2004). De igual manera, la ubicación de los suelos enterrados puede utilizarse como marcador temporal, de dónde es probable que se encuentren los artefactos y la ubicación de los artefactos dentro de un suelo, en ocasiones, se puede usar para asignar fechas aproximadas de estos (Hardman *et al.*, 1998; Homburg, 1988, en Brevik *et al.*, 2018). Sin embargo, existen ciertas limitaciones para el estudio del suelo, asociado a contextos culturales, como el cambio ambiental por el uso post-agricultural, que en ocasiones puede

dificultar los cambios asociados a las actividades prehispánicas (Holliday, 2004; Brevik *et al.*, 2018).

### **1.1 Planteamiento del problema**

De acuerdo con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), tan solo en el estado de Chiapas, existen al menos 3000 zonas arqueológicas registradas oficialmente. Mientras que solo una decena de ellas están abiertas al público, aún existe un gran número de zonas que no han sido estudiadas, las cuales son de vital importancia para entender la historia y organización política de las sociedades prehispánicas, así como su interacción con el medio ambiente. Es por ello que, durante los últimos años, un grupo multidisciplinario de investigadores se ha dedicado a estudiar los asentamientos pre-hispánicos, en la región de las Tierras bajas Mayas del sur, la cual incluye sitios arqueológicos como Budsilhá, La Mar, entre otros. Sin embargo, debido a la necesidad de entender la dinámica hombre-ambiente, es necesario estudiar los cambios locales en los suelos, propiciados por los asentamientos prehispánicos y su evolución.

### **1.2 Justificación**

La importancia de este proyecto, radica en complementar el registro pedológico de las Tierras bajas Mayas, en específico del Valle Budsilhá y sus alrededores, para conocer la variación local pedológica que existe en la zona. De esta manera, integrar la ciencia del suelo a un contexto arqueológico, permitirá entender la evolución de los suelos y la dinámica que estos han jugado con relación a los asentamientos pre-hispánicos.

### 1.3 Hipótesis

La evolución natural de los suelos y paleosuelos del Valle Budsilhá en el ambiente kárstico tropical de montaña, está condicionada por la interacción de los procesos pedogenéticos y la erosión, de tal forma que la cubierta edáfica forma un manto discontinuo: desde suelos delgados de unos cuantos centímetros a suelos de mayor de espesor, localizados sobre todo en las depresiones. Sin embargo, los procesos naturales han sido modificados debido a la ocupación pre-hispánica, lo cual también se refleja en el desarrollo de los suelos y los rasgos físicos de sus horizontes. Por lo tanto, gracias las propiedades de la memoria edáfica como su micro y macro estructura, porcentajes de granulometría, pH, Conductividad Eléctrica; es posible decodificar los rasgos más sobresalientes asociados a la actividad antropogénica, que repercuten en la modificación de las tendencias evolutivas naturales.

### 1.4 Objetivos

**Objetivo General:** Documentar la evolución de los suelos asociados al *karst* tropical de montaña, del Valle Budsilhá, influenciados por las actividades humanas pre-hispánicas, antes y después de su ocupación, haciendo uso de técnicas geo-arqueológicas, dentro y fuera de los sitios arqueológicos.

#### **Objetivos particulares**

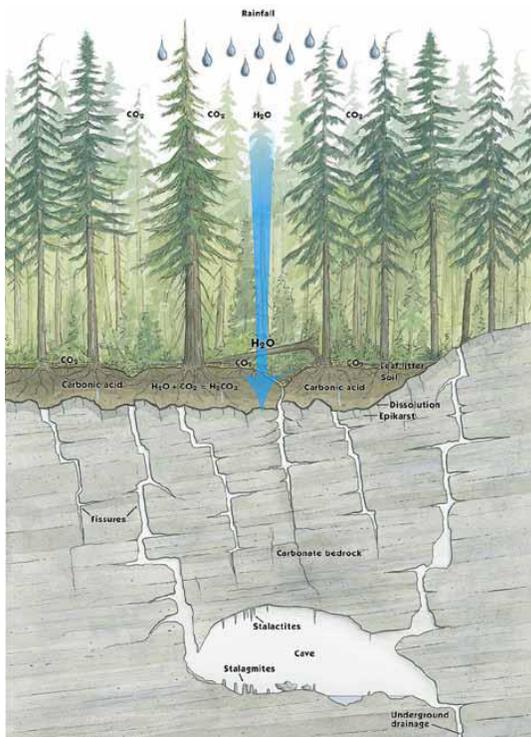
- Caracterizar perfiles de suelos y paleosuelos con evidencia de actividad antropogénica, y suelos no perturbados, que permitan comparar y evaluar sus características.
- Determinar mediante técnicas físicas y químicas, los cambios en las propiedades de los suelos actuales y los paleosuelos, como son la micromorfología, el estudio de la reactividad del suelo, granulometría y difracción de rayos X.
- Determinar el efecto de los asentamientos humanos en los suelos.
- Construir un modelo de evolución pedogenética natural, así como evidenciar las modificaciones en ellos por las actividades humanas.

## Capítulo 2 Marco Teórico

### 2.1 El Karst y sus principales geoformas

El término *karst* (*krs* en eslavo; *karr* en alemán, *carso* en italiano) es un término utilizado para referirse a la superficie de la tierra cuando las calizas u otras rocas solubles son las dominantes. En estas superficies, el relieve se caracteriza por la diversidad de formas principalmente negativas, como las depresiones tipo dolina y uvala y, positivas como las lomas y *karst* de torre, con tamaños que van desde formas milimétricas como los lapiaz, hasta los poljes de grandes extensiones, con un buen sistema de drenaje subterráneo, así como escasez de corrientes superficiales (Kueny y Day, 2002; Siart *et al.*, 2009; Priego *et al.*, 2010, en Fragoso *et al.*, 2014; Ford y Williams, 2007)

El proceso fundamental de formación de *karst* es la disolución por el ácido carbónico, el cual es un compuesto, que se forma cuando el agua de lluvia toma CO<sub>2</sub> atmosférico, para formar ácido carbónico como se muestra en la siguiente reacción: CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O ↔ H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ácido carbónico). Sin embargo, la concentración de CO<sub>2</sub> tiene su máximo cuando entra en contacto



**Fig.1** Proceso de karstificación, en Stokes *et al.*, 2010.

con el suelo. Ya que, en la atmósfera el contenido normal de CO<sub>2</sub> es del 0.033%. De esta manera, la descomposición de la materia orgánica, así como la respiración de las raíces, desprende grandes cantidades de este gas, el cual, en las proximidades del suelo, puede llegar a concentraciones de hasta el 1% de CO<sub>2</sub> (300 veces más que en la atmósfera).

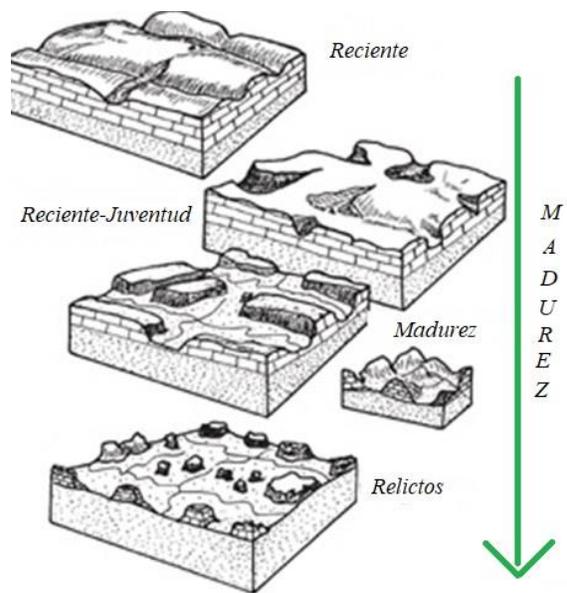
Por consiguiente, el contenido de CO<sub>2</sub> del agua puede llegar a ser muy elevado, fomentando la producción de ácido carbónico, el cual, al entrar en contacto con la roca caliza, se infiltra a través de las grietas, disolviendo poco a poco la roca carbonatada, como ejemplifica la siguiente reacción: CaCO<sub>3</sub> (roca carbonatada) + H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ↔ Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonato).

Explicándose así, la “agresividad” del agua en los sistemas *kársticos*, la cual es mayor en aguas con temperaturas muy frías, alcanzando solubilidades de 70mg/L de CO<sub>3</sub>Ca, que en climas cálidos. De esta manera, el CO<sub>2</sub> es el motor de la karstificación, el cual continua hasta la total desaparición del gas existente en el agua (Ford y Williams, 2007; Peiro, 1995),

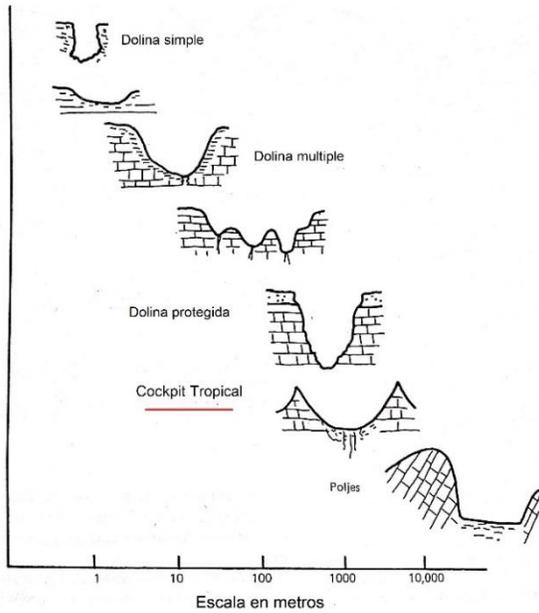
Sin embargo, las rocas solubles también están sujetas a la acción de factores extrínsecos que inciden en su desarrollo. Como menciona Barea-Luchena (1995) los factores adicionales que influyen en los procesos de *karstificación* son: **1)** el litológico, **2)** el estructural y **3)** el climático. Posteriormente se incorporaron dos factores más, la vegetación y el tiempo de exposición de la roca al intemperismo (Blair, 1986; Bautista *et al.*, 2011).

De acuerdo a lo anterior, existen distintos tipos de *karst*. El más relevante para esta investigación es el *karst* tropical de montaña, el cual se forma generalmente en regiones cálidas y húmedas y, se caracteriza por cerros en forma cónica, en cúpula o torre, separados por dolinas tipo planicies aluviales (Slagmolen, 1988, en Espinasa 2007).

Las teorías clásicas del desarrollo del paisaje kárstico, se basan en varias etapas de formación y transición que están relacionadas, principalmente, con la disolución de rocas calcáreas (Grund, 1914; Cvijic 1918, en Gutiérrez, 2012). De igual manera, Bautista *et al.* (2005) observaron un aumento en el número de geoformas y la deposición de residuos de disolución con el avance del proceso de *karstificación* en el paisaje, así como un aumento en su “rugosidad” conforme aumenta la madurez de la superficie, como se observa en la figura 2. Esto se asocia con el número de formas positivas en las distintas etapas de evolución.



**Fig. 2** Evolución de un paisaje kárstico tropical, en Bautista *et al.* (2005), modificado.



**Fig. 3** Geformas cerradas y sus escalas, en White (1988), modificado.

Un rasgo característico de los paisajes *kársticos* tropicales, es que la superficie se inclina hacia depresiones cerradas de las cuales la única salida es en forma de infiltración, generando un “relieve cerrado” o tipo dolina (White, 1988). Sin embargo, dependiendo el tamaño y forma, se clasificarán en distintas geoformas, como se muestra en la figura 3. A medida que las depresiones cerradas aumentan, generalmente desarrollan más de un punto de entrada y pueden formar un conjunto subsidiario de canales de drenaje en la superficie. De esta manera, estas depresiones conforman grandes sumideros llamados

*Cockpits*, que se encuentran típicamente en calizas de gran espesor, en climas tropicales. Dichas geoformas, tienen forma de cuenco de hasta 1 km o más de diámetro, los cuales suelen ser lo suficientemente grandes como para que se desarrollen sistemas de canales subsidiarios en sus paredes. A menudo, este tipo de geoformas, se unen a lo largo de una cresta afilada y la masa residual de roca se deposita en la intersección de tres o cuatro *cockpits*. El ejemplo tipo, se encuentra en Jamaica en la región de Cockpits (Sweeting, 1958, en White, 1988) como muestra la figura 4. Como se mencionó, este paisaje es común en zonas tropicales y un ejemplo en México es el noreste de la Sierra Madre de Chiapas, donde se muestra una morfología similar (Fig. 5)



**Fig. 4** Cockpit Country, Jamaica, Fuente: Google Earth (2019).

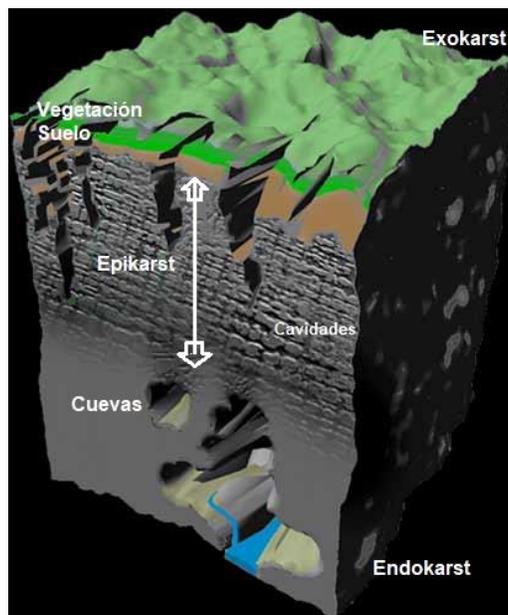


**Fig. 5** Cockpits, Budsilhá, Chiapas, México, Fuente: Google Earth (2019).

La formación del *karst* depende principalmente de la forma en que se infiltra el agua a través del suelo y posteriormente a la roca madre (Stokes *et al.*, 2010). Por lo tanto, el estudio del *karst* puede dividirse en al menos tres dimensiones la cuales se muestran en la figura 6.

La primera de ellas es el *Exokarst*, el cual engloba todos los rasgos encontrados en la superficie del paisaje kárstico, que abarca desde pequeña a gran escala. La segunda es el *Epikarst* o zona subcutánea, la cual se localiza en la zona más cercana a la superficie de la roca alterada, incluyendo el suelo (si hay alguno) y tiene su límite donde yace el *Endokarst*, entre 10-30 m por debajo de la superficie (Stokes *et al.*, 2010; Ford y Williams, 2007).

De esta manera, la zona del *Epikarst* juega un papel muy importante en el desarrollo de los sistemas kársticos, ya que permite que el agua, el aire y otros materiales (sedimentos, fragmentos orgánicos y nutrientes) sean fácilmente transportados de la superficie hacia el subsuelo; funcionando también como una zona de “recarga temporal” para el sistema, ya que las rocas expuestas en superficie crean pequeños pozos ocultos, los cuales se rellenan de agua debido a la infiltración (Klimchouk, 2004). Finalmente, la última dimensión es el *Endokarst*, el cual engloba todos los componentes más profundos del paisaje kárstico subterráneo, incluyendo pequeñas cavidades, espeleotemas en cuevas, sedimentos de cuevas y pasajes de cueva (Stokes *et al.*, 2010).



**Fig. 6** Unidades del paisaje kárstico y sus límites, en Stokes *et al.*, 2010, modificado

## 2.2 El karst en México



*Fig. 7 Karst en México, en Espinasa, (2007).*

A pesar de su importancia por su relación con las aguas subterráneas y el desarrollo turístico, el *karst* en México ha sido poco estudiado desde el punto de vista pedológico, ya que es reconocido principalmente en los estudios espeleológicos (Fragoso *et al.*, 2014). Sin embargo, aproximadamente 15-20% del territorio nacional está ocupado por rocas solubles, principalmente calizas y en menor proporción yesos (Gutiérrez-Elorza, 2008). Estos paisajes se localizan principalmente en la Península de Yucatán, la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, y la Sierra de Chiapas (Espinasa, 2007) (Fig.7)

Por lo tanto, el estudio del *karst* y el *epikarst* en México es importante, ya que guarda una estrecha relación con la erosión y redeposición de los suelos, inducido por el cambio climático, la tectónica o la deforestación y degradación de suelos; la última componente puede estar vinculada principalmente con la ocupación humana, la cual ha tenido un impacto significativo por la cultura Maya, en torno al comienzo del periodo Preclásico Temprano en el año 1000 a.C., que ha durado hasta la actualidad, en gran parte del sur de México. (Liendo *et al.*, 2014; Pohl *et al.*, 1996; Brenner *et al.*, 2003, en Beach *et al.*, 2006).

Como se describió anteriormente, el patrón climático es esencial para el desarrollo de los distintos tipos de *karst*. Por ejemplo, el *karst* de la Sierra de Chiapas, se desarrolla principalmente debido al tipo de roca caliza y posteriormente, a que recibe grandes cantidades de humedad, por posicionarse geográficamente entre el Golfo de México y el Océano Pacífico, desarrollando *karst* tropical (Espinasa, 2007).

### **2.3 Suelos tropicales del sur-este mexicano**

La formación de suelo en cualquier superficie de roca y clima es un proceso natural en el cual los minerales, no se encuentran en un equilibrio químico con las condiciones locales de agua y temperatura. Por lo tanto, se transforman a fases más estables bajo las condiciones ambientales. Algunos componentes son lixiviados y removidos preferencialmente; otros se quedan atrás en formas modificadas (White, 1988).

De esta manera, los suelos desarrollados en rocas carbonatadas, en general, tienen dos características que los distinguen de los suelos formados en otro tipo de rocas: (1) son un residuo más que un producto de descomposición, ya que una alta proporción de la roca madre se elimina en solución. (2) Debido al drenaje interior de las áreas *karsticas*, los suelos a menudo pueden estar bien drenados, con excepción de suelos muy arcillosos como los Gleysoles. La lixiviación puede llevarse a cabo con mayor eficiencia que en muchos ambientes del suelo. Adicionalmente, White (1988) menciona que los suelos en terrenos *kársticos* pueden tener varias fuentes:

- a) Suelos residuales compuestos por la fracción insoluble de la roca de carbonato.
- b) Suelos coluviales, que se desplazaron sobre el terreno de carbonato desde áreas posiblemente no carbonatadas en pendientes más altas.
- c) Suelos aluviales llevados al *karst* por corrientes superficiales preexistentes o contemporáneas. Los suelos de las tierras altas en las regiones *kársticas* son con frecuencia bastante diferentes de los suelos en las llanuras aluviales de las corrientes incisas.

Como se describió anteriormente, el proceso de karstificación causa la disolución de la caliza y provee de materiales para la formación de suelos. Sin embargo, el mismo proceso genera la pérdida de suelo a través de las fracturas y poros hechos por la disolución, como se observa

en la figura 6. De esta manera, los materiales del suelo pueden ser retrabajados y transportados hacia otras áreas y formar un nuevo material parental para un nuevo suelo (Cabadas *et al.*, 2010; Solleiro *et al.*, 2015).

Algunas de las áreas donde suelen depositarse suelo o sedimentos, son bolsas kársticas, las cuales son depresiones cerradas que actúan como trampas de suelo o sedimentos. Este tipo de depresiones, son formadas debido a la disolución, o por formas preexistentes como pliegues o fallas (White, 1988).

De esta manera, los suelos tropicales se caracterizan por tener altas tasas de intemperismo y desintegración de rocas, debido a las altas temperaturas y grandes cantidades de precipitación a lo largo de un año. A menudo, los perfiles de suelo presentan coloraciones rojizas o amarillentas, que son el resultado de un alto contenido de óxidos de hierro. La profundidad de la pedogénesis en los trópicos puede llegar a varios decímetros, en donde el fuerte intemperismo conduce a una destrucción casi completa de los minerales silicatados. Por consiguiente, debido a que casi todo el material soluble es lixiviado por el agua de lluvia, el pH es generalmente bajo. Además de los óxidos de Fe y Al, otros residuos típicos son las arcillas, en su mayoría representadas por minerales de arcilla 1: 1 de baja actividad, como la caolinita. Finalmente, esto conduce a una baja capacidad para almacenar nutrientes en el suelo y, por lo tanto, a una baja saturación de las bases (Scheffer y Schachtschabel, 2002, en Wiesbeck, 2012)

De acuerdo a Bautista *et al.* (2011), los tipos de suelos más comunes para las zonas kársticas, como la Península de Yucatán, son Leptosoles (la mayoría de ellos Rendzinas), Gleysoles, Luvisoles, Cambisoles y Vertisoles, asociados con Nitisoles, Arenosoles y Solonchaks.

Sin embargo, algunos de los principales tipos de suelos para las zonas montañosas del sureste de Chiapas, se encuentran dominados por suelos rojizos y arcillosos clasificados como Luvisoles. El siguiente grupo de suelos son Phaeozems, Vertisoles y Regosoles (Krasilnikov *et al.*, 2013).

## 2.4 Tierras bajas Mayas



*Fig. 8 Distribución de las Tierras Mayas, en rojo las Tierras bajas Mayas del sur, en Solís (2016), modificado.*

Una de las culturas más estudiadas en Mesoamérica es la cultura Maya, la cual abarcó los actuales estados del sur de México como, Chiapas, Campeche, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo; así como los países de Belice, Guatemala, Honduras y El Salvador. Es por ello que, para facilitar su estudio, el área Maya se ha clasificado en tres principales regiones (Fig. 8). La primera pertenece a las Tierras Altas del Pacífico, las cuales abarcan al norte con la región de Ocosingo, donde colinda con las montañas al norte de Chiapas, así como con la Selva Lacandona y las tierras altas de Guatemala, ubicadas al este. Presenta un relieve muy accidentado y

su altitud varía notablemente (600 a 2800 m.s.n.m). La segunda subregión pertenece a las Tierras bajas del sur, las cuales no sobrepasan los 800 m.s.n.m y comprenden el sureste de la Península de Yucatán y la zona colindante con la Alta Verapaz, Guatemala. La última subregión, pertenece al norte de la península de Yucatán o Tierras bajas del norte (Lampe, 2016; Lowe *et al.*, 2010 Aliphath y Caso, 2013).

De esta manera, la zona de estudio del presente proyecto se encuentra en las Tierras bajas del sur, las cuales forman parte del asentamiento de los principales pueblos Mayas independientes, entre los que se encontraban los, Itzaes, Lacandones y Choles del Manché, que desempeñaron un papel preponderante en la resistencia a la dominación hispana (Aliphath y Caso, 2013).

En cuanto a la temporalidad de la cultura Maya, es necesario recalcar los periodos durante los cuales se desarrollaron. El primero de ellos pertenece al periodo Preclásico (2000 a.C. -

250 d.C.) el cual se caracterizó por la existencia de comunidades sedentarias y la introducción de la cerámica y figurillas de barro cocido. Posteriormente, el periodo Clásico (250 – 900 d.C.) durante el cual se produjo el surgimiento de las ciudades más grandes y avanzadas, así como un desarrollo intelectual y artístico significativo, sobre todo en las tierras bajas del sur. Por ejemplo, durante el periodo Clásico Temprano, se presenta un crecimiento significativo de la población a lo largo del río Usumacinta y, en la región de la Sierra de Chiapas (Lampe, 2016; Coe, 1999; Foias, 2014).

También se presenta la aparición de importantes dinastías locales en Palenque, Piedras Negras, Yaxchilán, Pomona, Reforma y Chinikihá, todos estos sitios con gran influencia en tiempos posteriores (Liendo *et al.*, 2014).

Sin embargo, durante este periodo comenzó el colapso de la civilización. Finalmente, durante el periodo Postclásico (900 – 1531 d.C.) los centros de actividades se trasladaron a las Tierras Bajas del Norte y las Tierras Altas Mayas, pero la presencia de los Mayas se redujo significativamente en este (Lampe, 2016; Coe, 1999; Foias, 2014; Liendo *et al.*, 2014).

## Capítulo 3 Área en estudio

### 3.1 Ubicación

El estudio se realizó, principalmente, en el Valle Budsilhá, el cual se encuentra al sureste del estado de Chiapas, a ~70km de la zona arqueológica de Palenque y a ~15km de Piedras Negras, Guatemala; como se observa en la figura 9, recuadro rojo. Este Valle debe su nombre al afluente Budsilhá, el cual drena al río Usumacinta (Fig. 10).

Durante el proyecto se realizaron dos temporadas de campo. En la primera temporada (2018), se estudiaron varios perfiles del Valle Budsilhá y adicionalmente un perfil al noroeste de dicho Valle en el rancho El Milagro, denominado Perfil Bonfil (Fig. 10, en rosa). Mientras que, durante la segunda temporada (2019), también se estudió el Valle Budsilhá, además de un par de perfiles al sureste del Valle, en el poblado Lacanjá-Tzeltal, como muestra la figura 10, en amarillo, todos los sitios estudiados pertenecen a las Tierras Bajas Mayas.



*Fig. 9 Sureste mexicano, área de estudio en recuadro rojo. Mapa elaborado por Golden et al., (2019) modificado.*



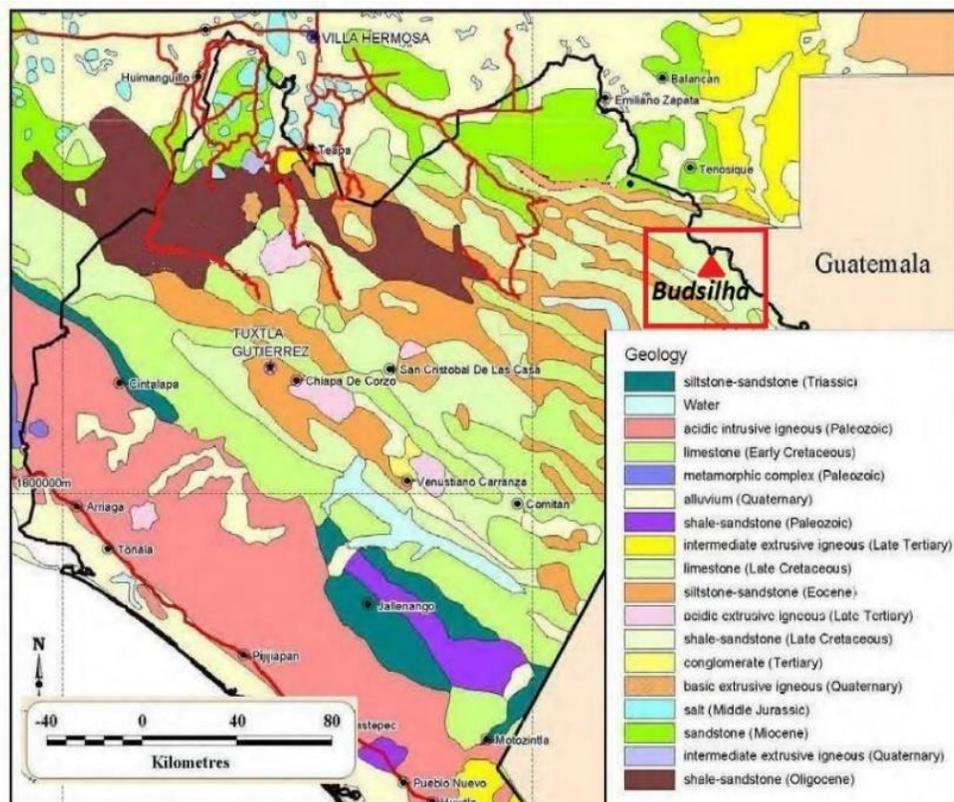
**Fig. 10** Vista general del área de estudio, se muestran los sitios estudiados en las Tierras bajas Mayas, al Noroeste el Perfil Bonfil (rosa), al centro Valle Budsilhá (Verde), y al sureste Lacanjá Tzeltal (Amarillo), Fuente Google Earth, 2019.

### 3.2 Geología y geomorfología del sur-este del estado de Chiapas

En la región que comprende los estados de Chiapas y Tabasco aflora una amplia secuencia del Mesozoico y Cenozoico, constituida principalmente por rocas sedimentarias marinas que se encuentran plegadas y afalladas. Esta secuencia descansa sobre un basamento cristalino del Precámbrico y Paleozoico que aflora al suroeste de la misma región, en donde las rocas cristalinas de estas eras, forman un complejo batolítico y metamórfico que constituye el núcleo de la Sierra de Soconusco. Gran parte del norte del estado de Chiapas, yace sobre un banco calcáreo debido a la transgresión marina de inicios del Cretácico, lo que da como resultado la sedimentación de carbonatos y rocas evaporíticas como yesos y anhidritas, en estas regiones, así como el desarrollo de depósitos de talud en una franja que bordeaba el gran banco calcáreo. Esta franja se puede localizar en el subsuelo de la mitad este del estado de Tabasco y, en porciones del noreste de Chiapas (Viniegra, 1981 en Moran *et al.*, 1984).

Por otra parte, la geomorfología, se caracteriza por una serie de sierras y planicies aluviales, debido al fuerte tectonismo activo, producto del límite de tres placas tectónicas, la placa

norteamericana, la placa del Caribe y la placa de Cocos. Una de las geoformas más importantes es la Sierra Madre de Chiapas (SMC), constituida por calizas pertenecientes al Jurásico y Cretácico, las cuales se encuentran fuertemente plegadas (Fig. 11). Además, la SMC está rodeada por sedimentos fluviales y aluviales del Holoceno producto de la denudación de las rocas, los cuales han sido transportados principalmente por el Río Usumacinta (Morán, *et al.*, 1984).



**Fig. 11** Geología regional del estado de Chiapas, recuadro rojo se observa el área de estudio Budsilhá, mapa disponible en Seccombe y Giroux 2011.

### 3.3 Clima

El estado de Chiapas presenta clima cálido húmedo en más de la mitad de su territorio (54%). Mientras que el 40% presenta clima cálido-subhúmedo, el 3% es templado-húmedo y el 3% restante es templado- subhúmedo, lo cual se ejemplifica en la figura 13.

La temperatura media anual varía dependiendo de la región, de 18°C en los Altos de Chiapas, a 28°C en la Llanura Costeña. La temperatura promedio más alta es de 30°C, en los meses de junio a septiembre y la mínima de 17.5°C.

La región norte del estado presenta lluvias todo el año, en el resto de la entidad, abundantes lluvias en verano. La precipitación total anual varía, dependiendo de la región, de 1 200 mm a 4 000 mm (INEGI, 2017).

Como se observa en el recuadro rojo (Fig. 12), el clima para la zona en estudio es principalmente cálido húmedo, con lluvias todo el año.

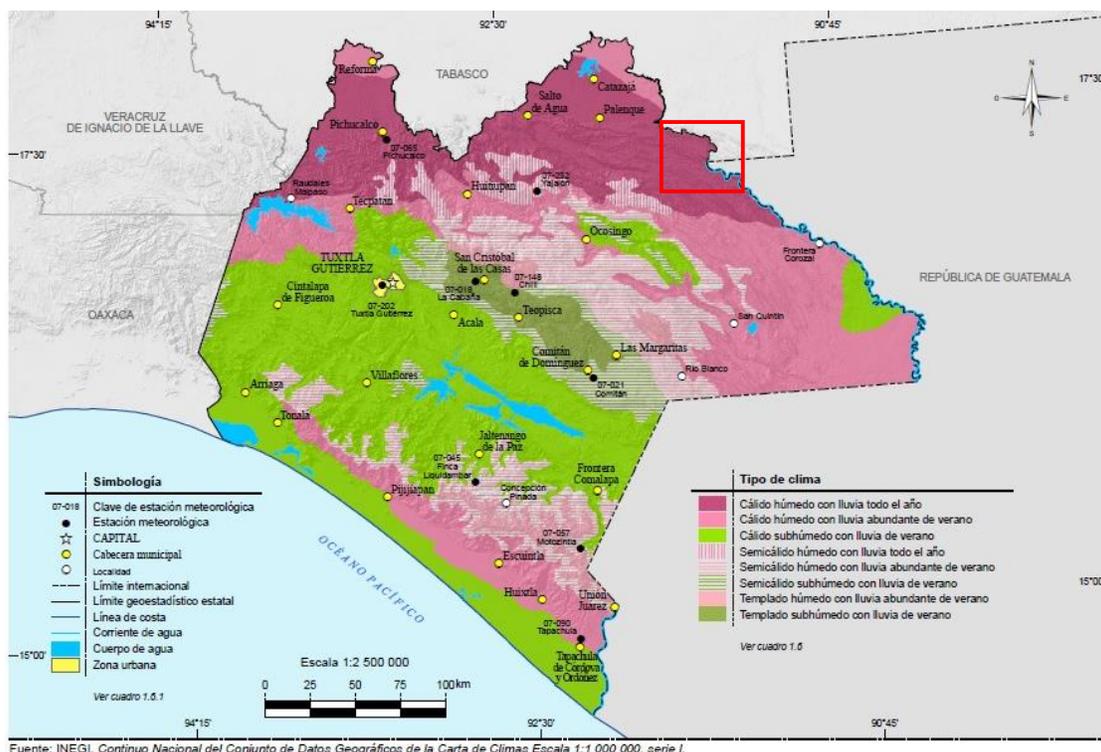


Fig. 12 Carta climática del estado de Chiapas, fuente: INEGI 2017

### 3.4 Vegetación de Chiapas

En general la vegetación del estado de Chiapas, desde la costa hasta las partes altas de la Sierra Madre del Sur, predominan las selvas húmedas, alcanzando su máxima representación en la Selva Lacandona. Sin embargo, grandes extensiones de selva han sido reemplazadas por tierras de pastizales utilizados para la ganadería. Le siguen los bosques de coníferas y encinos y los bosques húmedos de montaña, así como los pastizales cultivados. Adicionalmente, la agricultura ocupa 39% del territorio (INEGI 2017; Rzedowski 1983).

Adicionalmente, en el Valle Budsilhá, predominan los pastizales como se observa en la figura 13. Mientras que en las lomas circundantes se observa una selva alta, perteneciente al bosque templado perennifolio (Fig.14)



*Fig. 13 Vegetación Valle Budsilhá, fotografía propia.*



*Fig. 14 Bosque templado perennifolio, fotografía Jaime Díaz.*

## Capítulo 4 Metodología

### 4.1 Trabajo de campo

Como se mencionó anteriormente, se llevó a cabo dos temporadas de campo (junio 2018 y 2019), durante las cuales se realizaron observaciones del relieve, que permitieron distinguir las geoformas asociadas al *karst* tropical de montaña, junto con sus depresiones intermedias, formadas por los cauces de distintos tributarios.

Posteriormente, se realizaron 14 perfiles de suelos, los cuales se eligieron con respecto a su posición en el relieve y cercanía a las zonas arqueológicas. De esta manera, los perfiles realizados formaron catenas de suelos en el Valle Budsilhá, las cuales permitieron diferenciar el impacto de los factores formadores en la tipogénesis de los suelos. Este tipo de muestreo está orientado a reconocer las diferentes propiedades de los suelos y determinar sus variaciones en la pedogénesis (Fig. 15).

Por consiguiente, se puede realizar una comparación sobre las modificaciones que ocurren en los suelos por el efecto del relieve y las actividades humanas, en dichas catenas.



*Fig. 15 Trabajo de campo, temporada 2019.*

Durante dichas temporadas, se tomaron muestras de los perfiles de suelo, por cada horizonte genético, tanto alteradas como inalteradas. Las muestras alteradas se usaron en el trabajo analítico para laboratorio, mientras que las inalteradas, se utilizaron para realizar la micromorfología.

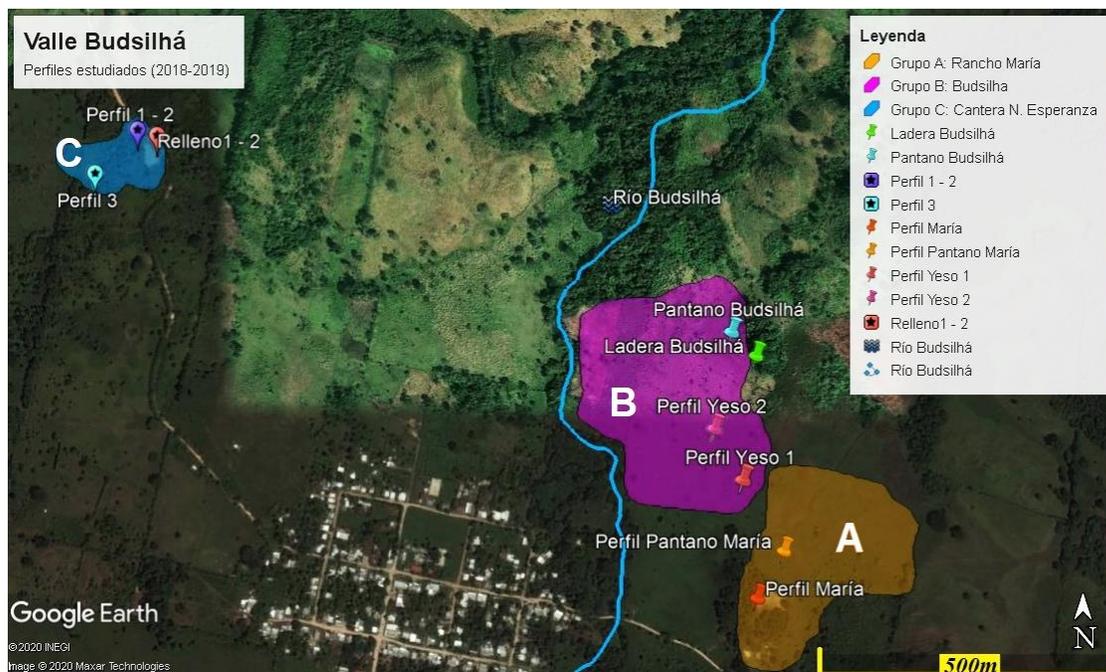
Adicionalmente, se tomaron muestras de agua en tres sitios, cercanos a los suelos que presentaron neoformaciones de yeso, con el objetivo de valorar su papel en la génesis de estos minerales encontrados en los suelos

Los análisis de laboratorio se hicieron siguiendo la guía de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2015). Las propiedades analizadas fueron: micromorfología, textura, color, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y propiedades asociadas a la fertilidad de los suelos, descritas en el apartado 4.8.

#### 4.2 Perfiles de suelo estudiados

Los 14 perfiles de suelo estudiados, fueron distribuidos en distintas microcuencas del área de estudio, como se muestra en la figura 16.

Adicionalmente, en la tabla 1 se describe el total de los perfiles estudiados, los cuales fueron divididos en cuatro grupos. El grupo **A)** Rancho María, grupo **B)** Budsilhá, grupo **C)** Cantera Nueva Esperanza, y grupo **D)** Integra perfiles relacionados con las excavaciones arqueológicas, fuera del Valle Budsilhá; los cuales se describen con mayor detalle en el capítulo 5.



**Fig. 16** Ubicación de los perfiles realizados en el Valle Budsilhá, Temporadas 2018 y 2019, **A)** Grupo María, **B)** Grupo Budsilhá, **C)** Grupo Cantera Nueva Esperanza, Fuente Google Earth 2019.

**Tabla 1.** *Perfiles de suelo estudiados durante las temporadas 2018 y 2019*

<b>Grupo A:</b> Rancho María	<b>Grupo B:</b> Valle Budsilhá	<b>Grupo C:</b> Cantera Nueva Esperanza	<b>Grupo D:</b> Perfiles fuera del Valle Budsilhá
Perfil María (2018)	Ladera Budsilhá (2019)	Relleno 1 (2019)	Perfil Bonfil (2018)
Pantano María (2019)	Pantano Budsilhá (2019)	Relleno 2 (2019)	Perfil Sak – 1 (2019)
	Yeso 1 (2018)	Perfil 1 (2019)	Perfil Sak– 2, Operación 7A (2019)
	Yeso 2 (2019)	Perfil 2 (2019)	
		Perfil 3 (2019)	

En todos los perfiles, se hizo una descripción de los horizontes genéticos y se tomaron muestras para el análisis de laboratorio. Se buscó que los perfiles representaran diferentes condiciones de formación, sobre todo relacionados con variaciones en el relieve, de manera que se construyeron pequeñas catenas.

Posteriormente, los suelos fueron clasificados de acuerdo con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2015)

#### **4.3 Preparación de las muestras**

De las muestras recolectadas para los análisis de laboratorio, se tomó la mitad de cada muestra, una para secar a 60°C durante dos días y las demás conservaron su humedad de campo, para futuros estudios. Posteriormente, las muestras secas fueron tamizadas con tamiz de 2 mm.

## **4.4 Parámetros fisicoquímicos**

### **4.4.1 pH**

La determinación de la reactividad del suelo, como pH y Conductividad Eléctrica, se realizó en el laboratorio de Biogeoquímica y Materia Orgánica del Suelo, a cargo del Dr. Bruno Chavez y la Mtra. Ofelia Beltrán del Instituto de Geología, UNAM, en base al Manual de Procedimientos Analíticos (Flores y Alcalá, 2010)

El procedimiento consistió en tamizar la muestra de suelo y pasarla por un tamiz de 2 mm, para posteriormente colocarse en una relación de 1:2:5 con agua destilada. Posteriormente, se agitó la suspensión obtenida durante 24 hrs. A continuación, se realizó la prueba de pH con el pH-metro *Thermo Scientific*, sumergiendo el electrodo de pH en tubos Falcon de 50 ml, que contenían la suspensión y, con agua destilada se limpió el electrodo, después de cada medición.

### **4.4.2 Conductividad eléctrica (C.E.)**

El procedimiento para esta técnica, fue muy similar al realizado para la medición de pH, pero con un juego distinto de muestras. De igual manera se utilizó una relación de 1:2:5 y, se utilizó el electrodo para conductividad eléctrica. Posteriormente, se limpió el electrodo con agua destilada después de cada medición.

### **4.4.3 Pruebas de Fertilidad en suelos**

Las pruebas de fertilidad se realizaron en el laboratorio Labs & Technological Services AGQ, S.L. Estas pruebas se aplicaron a 6 horizontes orgánicos (6 horizontes) y uno mineral, con un total de 7 muestras. Las cuales, en general, constituyen la superficie en la que han tenido lugar las actividades antrópicas.

Los parámetros medidos fueron tres principales:

- **Fertilidad:** fósforo disponible y nitrógeno total (Método Olsen), nitrógeno nítrico, nitrógeno amoniacal (KCl).
- **Complejo de cambio:** capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables (Método Ac NH<sub>4</sub>).
- **Otros parámetros físicos químicos:** Carbono Orgánico Total (Método: combustión, PNT: PEC-013).

#### 4.4.4 Cromatografía iónica

Este análisis se realizó para muestras de agua de pantano, a las cuales se les realizó la determinación de iones mayoritarios por cromatografía iónica (CI) en el laboratorio de Geoquímica Ambiental del LANGEM a cargo del Dr. Mario Villalobos Peñalosa y el M. en C. Arturo Mendoza Flores.

Las muestras fueron filtradas por membrana de nitrocelulosa con tamaño de poro 0.45 µm para ser analizadas por cromatografía de iones. Para la determinación de la alcalinidad de agua, se tomó una alícuota de 30 mL y fue titulada con HCl 0.017N. Se siguió el procedimiento señalado en la NMX-AA-036-SCFI-2001.

El análisis se llevó a cabo en un cromatógrafo de iones Metrohm 883 Basic IC Plus con un detector de conductividad. Para el análisis de cationes, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, se utilizó una columna empacada con una fase estacionaria de sílica gel modelo Metrosep C4 250/4.0 con una fase móvil compuesta de ácido oxálico dihidratado con HNO<sub>3</sub>.

En el caso de los aniones, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>3</sub><sup>4-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, se utilizó una columna de polivinilalcohol con grupos de amonio cuaternario modelo Metrosep A Supp 4 250/4.0 con una fase móvil de NaHCO<sub>3</sub> /Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> con supresión química. Adicionalmente, se realizó la determinación de alcalinidad en agua. Se usó HCl 0.017 N. Aplicando la norma: NMX-AA-036-SCFI-2001

#### **4.5 Análisis granulométrico**

El análisis de textura o granulométrico está basado en el Manual de Procedimientos Analíticos (Flores y Alcalá, 2010). 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. De esta manera, se tomó una muestra del material obtenido en campo, se trituroó en un mortero y posteriormente se tamizó con un tamiz de abertura 2 mm. Posteriormente, se pesaron 10g por muestra para realizar el análisis.

El primer paso consistió en eliminar los agentes cementantes, materia orgánica con Peróxido de Hidrogeno ( $H_2O_2$ ) y óxidos de hierro con Ditionito de Sodio.

Posterior a eliminar dichos agentes, los 10g de muestra, se colocaron en frascos *Nalgene* y se les añadió 25ml de agua destilada y 10 ml de hexametáfosfato. Para posteriormente, agitar un tiempo de aproximadamente 12hrs, dispersando todas las partículas.

##### **Determinación de arenas (0.05 - 2mm)**

Después de 12 h, se separó la fracción arena del limo y la arcilla, pasando el material en un tamiz de 56  $\mu m$  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 (<0.002 mm)**

La fracción limo y arcilla, se colocó en probetas de 1 L adicionando 10 ml de solución de hexametáfosfato y se aforó a 1L con agua destilada. Con la suspensión lista, se agitó y se dejó reposar aproximadamente cuatro horas para la separación los limos y las arcillas. Pasadas las cuatro horas, se tomó una alícuota de 25ml de cada muestra 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.

### **Determinación de limo (0.05-0.002 mm)**

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*, 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).

### **4.6 Micromorfología de suelos**

La preparación de las muestras para realizar láminas delgadas, consistió en utilizar las muestras inalteradas que se tomaron en campo, aplicando el siguiente procedimiento.

#### **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 minutos, para evitar que se formen burbujas. Posteriormente, se dejaron secar una semana 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, se devastaron y pulieron de un solo lado para obtener una superficie plana, utilizando una secuencia de lijas, de: 80, 120, 220, 360, 400, 600 y 1000 para algunas muestras.

#### **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  $\mu\text{m}$ , 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 y diésel, hasta llegar a su grosor final utilizando un microscopio petrográfico sencillo.

#### 4.7 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*, basándose en los manuales de Loaiza et al. (2015); Bullock et al., 1999 y Stoops, Vera y Mees (2010), para definir los principales rasgos pedológicos y mineralógicos.

#### 4.8 Difracción de Rayos X

La difracción de Rayos X es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina. Por lo tanto, es una de las herramientas principales para la identificación directa de minerales cristalinos del suelo. (Melgarejo *et al.*, 2010; Essington, 2015). La descripción de algunos de los minerales arcillosos más comunes en suelos, se describen a continuación (Tabla 2).

**Tabla 2.** Clasificación de algunas arcillas minerales, de acuerdo al Sistema de clasificación de Dana (1997), modificado

Tipo	Grupo	Subgrupo (ejemplos)	Especies (ejemplos)	Formula estructural
1:1	Caolinitas	Caolinitas	Dickita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
		Dioctaédricas	Halloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$
			Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
2:1	Micas	Muscovita	Muscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$
			Glauconita	$(Na,K)(Fe^{III},Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}$
		Biotita	Flogopita	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
			Biotita	$K(Mg,Fe)_3(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$
	Esmectitas	Esmectitas Dioctaédricas	Illita	$(K,H_3O^+)(Al,Mg,Fe^{II})_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,H_2O]$
			Vermiculita	$(Mg,Fe^{II},Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2(4H_2O)$
		Esmectitas Trioctaédricas	Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2(nH_2O)$

Esta técnica se realizó en 7 muestras distintas de suelo, en el laboratorio de Difracción de Rayos X del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM), a cargo de la Dra. Pi Puig.

Para preparar las fracciones orientadas, se tomaron 5 g de suelo tamizado y 10 ml de agua destilada en tubos Falcon de 50 ml, para posteriormente agitarlos durante periodos de 2 horas,

hasta homogeneizar la muestra. Teniendo la muestra homogeneizada, se centrifugó para realizar un raspado de la superficie, donde se depositaron las arcillas por gravedad. Al raspado final, se le colocó 1ml de peróxido de hidrógeno, para eliminar cualquier rastro de materia orgánica. A continuación, con una pipeta automática de 1 ml, se prepararon tres fracciones orientadas (en un soporte de vidrio) de cada muestra, cada una para los tratamientos que se realizan en difracción: muestra glicolada (etilenglicol) y calentada a 550°C. Posteriormente, se dejaron secar por un día para poder realizar las mediciones.

Finalmente, las muestras secas se llevaron al laboratorio de Difracción de rayos X, para obtener el análisis con un Difractómetro EMPYREAN equipado con un filtro de Fe, tubo de cobalto de foco fino y detector PIXcel3D.

## **Capítulo 5 Resultados**

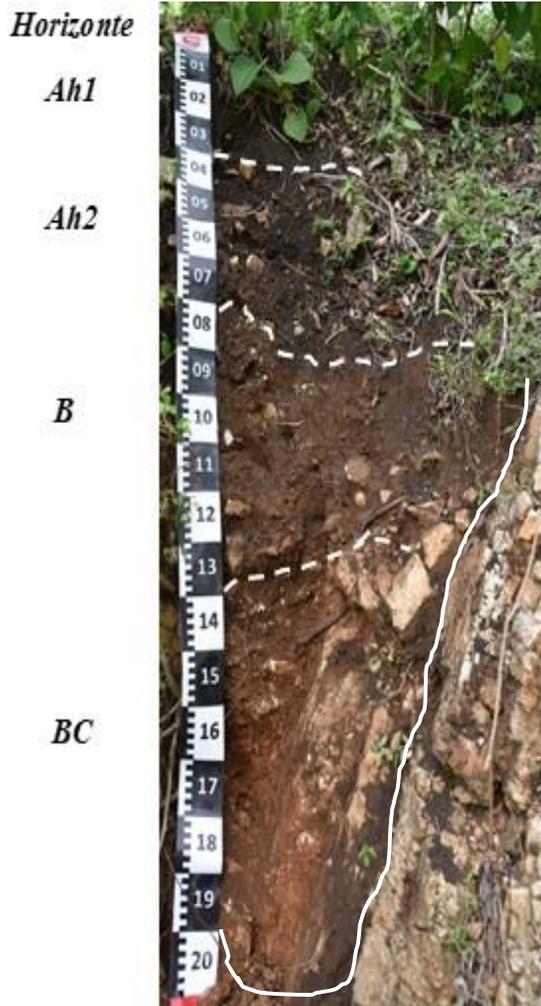
### **5.1 Descripción de los perfiles de suelo**

La mayor parte de la cubierta edáfica estudiada, se encuentra constituida por suelos delgados y negros, a menudo producto de coluviones, los cuales tienen un alto contenido de rocas (Leptosoles). Mientras que en algunas depresiones como las bolsas kársticas (Fig. 17), se presentan suelos con horizontes que evidencian abundante influencia antrópica antigua (Horizonte B) así como abundantes rocas. A continuación, se describen los perfiles estudiados en este proyecto, distribuidos en diferentes posiciones del relieve, construyéndose pequeñas catenas.

#### **Grupo A) Rancho María**

##### **Perfil María**

Este perfil tiene ~2 m de profundidad. Se encuentra en la ladera de una loma (N17°7'6.94", E91°22' 38.32", a 116 msnm), dentro de una bolsa kárstica desarrollada en un paquete de calizas (Fig. 17). Es un suelo pedregoso, que muestra un horizonte B, de manera que se le ha clasificado como un *Calcaric Cambisol (Colluvic)*.



**0-30 cm.** Horizonte **Ah1**, estructura granular, color 7.5YR 2.5/2 pardo oscuro, textura areno-limosa, pedregosidad de un 5%. Muestra acumulación de materia orgánica humificada, mezclada con la fracción mineral del suelo y abundante densidad de raíces.

**30-80 cm.** Horizonte **Ah2**, estructura granular, con color 7.5YR 2.5/2 pardo-oscuro, textura limo-arcillosa. Menor densidad de raíces que el horizonte Ah1. Este horizonte y el Ah2, forman parte de un Coluvion.

**80-130 cm.** Horizonte **B**, estructura en bloques subangulares, color 7.5YR 5/6 pardo rojiza, pobre densidad de raíces. Más compacto en la parte inferior del perfil, debido a la presencia de abundante material cultural como cerámica, huesos, caracoles y carbón.

**130-140 cm.** Capa conformada por lajas de roca caliza y fragmentos culturales, como huesos.

**140-200 cm.** Horizonte **BC**, pobre desarrollo de estructura, color 7.5YR 5/8 pardo rojiza, pedregosidad 50%, textura arcillo-limosa, aumenta el material parental, rocas calizas.

*Fig. 17 Perfil María en una bolsa kárstica*

## Perfil Pantano María

Se encuentra en la planicie inmediata, adyacente al Perfil María (N17°07'9.4", E91°22'37.8", 114 msnm). Es un perfil poco profundo (Fig. 18), con fuertes propiedades reductomórficas, debido a que está saturado por agua la mayor parte del año. Se tomó una muestra del agua que cubría el pantano, dando un pH de 7.49, una Conductividad Eléctrica (CE) de 600  $\mu$ S, a una temperatura de 32°C. Se le ha clasificado como un *Histic Stagnic Gleysol*.

### Horizonte



**0-5 cm.** Horizonte **Ahg<sub>1</sub>**, con estructura granular, color 10YR 2/1, pardo oscuro, alta densidad de raíces.

**5-15 cm.** Horizonte **Ahg<sub>2</sub>**, muestra características similares al Ahg<sub>1</sub> superior, pero este horizonte muestra más rasgos gleycos en su parte inferior.

**15-25 cm.** Horizonte **Cg**, estructura en bloques subangulares, que rompe en masivo, color 10YR 4/2 pardo grisácea, textura arcillosa. Presenta abundantes propiedades gleycas en toda su estructura, como motas grisáceas y rojizas. Presencia de algunas gravas redondeadas de caliza y caracoles.

**25 >30 cm.** Horizonte **2Ahg**, estructura en bloques subangulares, que rompe en granular, color 10YR 3/2 pardo oscura, textura arcillosa-limosa.

**Fig. 18** Perfil Pantano María, representa el tipo de suelo ubicado en el humedal, dentro del mismo rancho.

## Grupo B) Budsilhá

### Perfil Yeso 1

Los siguientes perfiles se encuentran cercanos al río Budsilhá. En una posición, ligeramente más alta que el perfil anterior (N17°7'13.14", E91°22' 40.1", a 117 msnm), se encuentra el perfil Yeso 1 en el Valle Budsilhá (colectado en 2018), el cual es un suelo de mediana profundidad. El rasgo más distintivo es la presencia de la abundante neoformación de cristales de yeso a partir del horizonte By (Fig. 19). Clasificado como un *Gypsic Reductic Gleysol*.



**0-15 cm**, horizonte **AB**, estructura en bloques subangulares, color 10YR 3/3, pardo oscuro, textura arcillo-limosa, acumulación de materia orgánica humificada, mezclada con la fracción mineral del suelo.

**15-25 cm**, horizonte **By**, estructura en bloques subangulares que rompen en angular, color 10YR 4/4 pardo grisácea, textura arcillosa, presenta abundantes neoformaciones de cristales de yeso tamaño arena gruesa con formas elongadas y dureza suave.

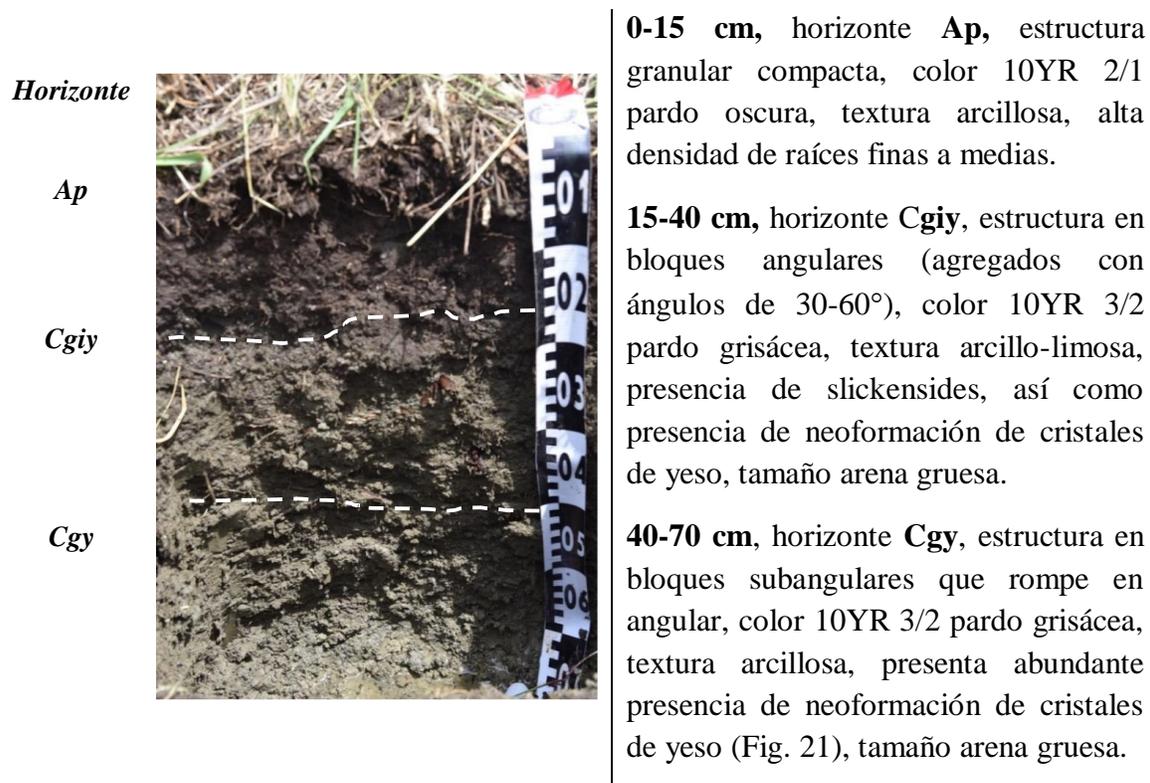
**25-52 cm**, horizonte **Cgy<sub>1</sub>**, estructura en bloques angulares, color 10YR 4/3 pardo grisáceo, textura arcillo-limosa con propiedades gleycas, reflejando condiciones de alternancia entre oxidación y reducción de sesquióxidos, también presenta cristales de yeso, tamaño arena muy gruesa.

**52-80 cm**, horizonte **Cgy<sub>2</sub>**, estructura en bloques angulares, color 10YR 4/3 pardo-grisácea, textura areno-limosa, con propiedades, presenta más cristales de yeso que el horizonte anterior, tamaño arena muy gruesa.

*Fig. 19 Perfil Yeso 1, Valle Budsilhá.*

## Perfil Yeso 2

Este perfil se realizó cerca del perfil anterior (N 17°07'15.9", E 91°22' 41.7", a 117 msnm) para entender mejor las condiciones de formación de los cristales de yeso en los suelos. Este perfil se encuentra seco en superficie, pero el nivel freático se encuentra a los 70 cm de profundidad (Fig. 20). Clasificado como un *Gypsic Reductic Gleysol (vertic)*.



*Fig. 20 Perfil Yeso 2 en el Valle Budsilhá.*



*Fig. 21 Ped del horizonte Cg, muestra cristales de yeso.*

Los siguientes perfiles se realizaron cerca del sitio arqueológico Budsilhá (Fig. 22), por lo que se construyó una pequeña catena, comenzado con la ladera y finalizando en el humedal.

El perfil Ladera (N17°07'19.9", E 91°22'39.3", a 118 msnm), yace sobre una pendiente de ~5°, es poco profundo y se desarrolla sobre calizas. A los 20 cm se presenta material cultural (cerámica) como se muestra en la figura 23, en rojo. Fue clasificado como un *Leptosol* (*Calcaric*).



**Fig. 22** Posición del Perfil Ladera Budsilhá

**Horizonte**

**Ah**

**AB**

**BC**



**0-12 cm.** Horizonte **Ah**, con estructura granular bien desarrollada, que rompe en pequeños bloques subangulares, color 7.5YR 2.5/3, pardo oscuro, textura arcillo-limosa. Densidad media de raíces finas. No muestra reacción al HCl.

**12-25 cm.** Horizonte **AB**, estructura en bloques subangulares que rompe a granular, color 7.5YR 3/4 parda, textura arcillo-limosa. Pedregosidad del 30-40%, con presencia de fragmentos de material cultural como cerámica. La matriz no reacciona al HCl, pero los fragmentos de roca sí.

**25> cm.** Horizonte **BC**, estructura en bloques subangulares, color 7.5YR 3/3, aumenta el contenido de fragmentos de rocas calizas 60%.

**Fig. 23** Perfil ladera Budsilhá.

El perfil Pantano Budsilhá, se ubica en el humedal, en la planicie inmediata al sitio arqueológico Budsilhá, (con coordenadas: N17°07'21.1", E 91°22' 40.7", a 118 msnm). Es poco profundo (Fig. 24); su límite inferior es el manto freático. En la superficie del perfil, se aprecian coloraciones rojizas (tapetes microbianos). También se tomó una muestra del agua del pantano, dando un pH de 6.4, una C.E. de 1760  $\mu$ S, a temperatura de 33°C. Clasificado como un *Histic Stagnic Gleysol*.

*Horizonte*

*Ag*

*Cg*



**0-15 cm.** Horizonte **Ag**, estructura granular, color 10YR 3/1 pardo oscuro, textura arcillosa, con manchas rojizas, abundante densidad de raíces y fragmentos de material vegetal descompuesto, el cual va disminuyendo con la profundidad.

**15-30 cm.** Horizonte **Cg**, estructura en bloques subangulares, color 10YR 5/4 pardo grisáceo, textura arcillosa, con una densidad baja de raíces finas, con algunas motas rojas al romper los agregados.

Ningún horizonte reacciona al HCl.

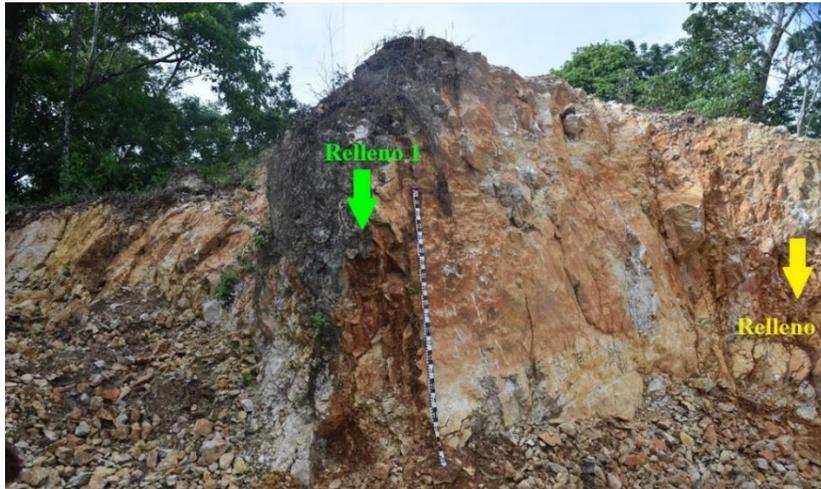
*Fig. 24 Perfil Pantano Budsilhá.*

### Grupo C) Cantera Nueva Esperanza

Se realizó otro grupo de perfiles en el poblado Nueva Esperanza, a menos de un kilómetro del sitio arqueológico Budsilhá. Estos perfiles se desarrollaron sobre una cantera de calizas bien drenadas, las cuales en su mayoría se encuentran frescas. No en todos los casos se tienen perfiles completos, sino que se presentan como rellenos de suelo en las rocas.

La cantera en la que se describieron los suelos, (N 17°07'31.4'', E 91°23'13.2'', a 123 msnm) permitió tener una visión de las relaciones estratigráficas.

Los Rellenos 1 y 2 se encuentran separados aproximadamente 3 m (Fig. 25). El Relleno 1 muestra un suelo de color rojizo que parece pertenecer a un suelo bien desarrollado, del que solo quedan restos (Fig. 26).



*Fig. 25 Cantera Nueva Esperanza, muestra los rellenos 1 y 2 encontrados en bolsas kársticas.*



La bolsa kárstica en la que está el Relleno 1 tiene 120 cm de profundidad, 5-10 cm de ancho. El suelo es de color 2.5YR 3/6 pardo rojizo, textura arcillosa, con estructura en bloques subangulares, sobre los que se aprecian delgados cutanes de iluviación de arcilla. La matriz reacciona al HCl.

Dentro del relleno, los fragmentos de roca ocupan un volumen del 10%.

*Fig. 26 Relleno 1 en la Cantera Nueva Esperanza.*

El Relleno 2 es similar al anterior, pero en él se aprecian manchas grisáceas evidenciando rasgos reductomórficos (Fig. 27)



Este relleno tiene una distribución irregular, que empieza a los 90 cm y aumenta a una profundidad de 150-170 cm, en donde se tomaron muestras para el trabajo de laboratorio. Este relleno tiene una estructura en bloques subangulares, con coloraciones pardo rojizas y una textura arcillosa.

En algunas caras de los agregados, podemos observar condiciones reductoras, en forma de moteados grisáceos.

*Fig. 27 Relleno 2 en la Cantera Nueva Esperanza.*

## Perfil 1

Además de los rellenos 1 y 2, se tomaron dos perfiles de suelo sobre las calizas de la Cantera Nueva Esperanza (Perfil 1 y 2): N17 07' 31.7", E 91 23' 14.3" a 113 msnm. A pesar de que ambos suelos se formaron sobre el sustrato calcáreo, observamos un cambio de facies en este último. De esta manera, el perfil 1 se encuentra sobre una caliza saprolitizada, que ha dejado un material, limoso (Fig. 28). Se clasificó como un *Leptic Cambisol (colluvic)*.

### Horizontes

*Ah*

*Bw*

*C*



**0-36 cm.** Horizonte **Ah** con estructura granular estable, color 10YR 2/2, textura limo-arcillosa, con un 40% de fragmentos de rocas, alta densidad de raíces medias y finas. Presenta un límite abrupto y es un horizonte coluvial.

**36-45 cm.** Horizonte **Bw**, con estructura en bloques subangulares, color 10YR 3/3, textura limo-arcillosa, con un 5% de fragmentos de rocas tamaño grava; presencia de poros biogénicos. Fuerte reacción al HCl y su límite inferior es gradual a irregular.

**45-92 cm.** Horizonte **C**, compacto con una estructura en bloques subangulares, color 10YR 8/4, textura limosa. Se trata de una saprolita de roca caliza.

*Fig. 28 Perfil 1 sobre caliza saprolitizada, en la Cantera Nueva Esperanza.*

## Perfil 2

A diferencia del perfil 1, el perfil 2 se encuentra sobre la roca dura. En general muestra más del 50% de rocas en toda su estructura, como podemos observar en la imagen 29. Sin embargo, dentro de las rocas se encontró el desarrollo de una bolsa kárstica, donde se definieron los horizontes mostrados. De este perfil, no fue posible obtener muestras para micromorfología. Finalmente, se clasificó como un *Haplic Regosol*.



**0-20 cm.** Horizonte **Ah**, de suelo coluvial con estructura granular que rompe en bloques subangulares, color 10YR 2/2, pardo oscuro, textura limosa. Contenido de pedregosidad del 50-60%. La matriz de suelo, reacción positiva al HCl. Muestra evidencias de quema.

**20-50 cm.** Horizonte **AC**, estructura granular, de coloración 10YR 2/2 pardo oscura, pedregosidad > 60%.

**50-80 cm.** Horizonte **BC<sub>1</sub>** con estructura granular frágil, color 10YR 3/3 parda y textura arcillo-limosa. Presencia de fragmentos de rocas calizas, tamaño grava 20%.

**80-170 cm.** Horizonte **BC<sub>2</sub>**, estructura en bloques subangulares, coloración 10YR 4/6, textura arcillosa, porcentaje de pedregosidad ~50%, conformado por las paredes de la bolsa kárstica, reacción positiva al HCl.

*Fig. 29 Perfil 2 sobre caliza, en la Cantera Nueva Esperanza.*

### Perfil 3

El último perfil (Perfil 3) se realizó sobre una colina, ubicada sobre la cantera Nueva Esperanza, con coordenadas: N17°07'29.3", E91°23'16.7", a 126 msnm. El perfil tiene 40 cm de profundidad, encontrándose el contacto con la roca (Fig. 30). A pesar de su poca profundidad, es un suelo bien desarrollado. Se clasificó como un *Leptic Luvisol*.



**0-4 cm.** Horizonte **A**, estructura granular, color 2.5YR 3/6 pardo rojiza, textura arcillo-limosa, con una alta densidad de raíces medias y finas. Presenta también fragmentos carbonizados.

**4-24 cm.** Horizonte **Bt<sub>1</sub>**, estructura en bloques subangulares, color 2.5YR 3/6 rojiza, textura arcillosa, con una alta densidad de raíces finas, presenta también fragmentos carbonizados.

**24-40 cm.** Horizonte **Bt<sub>2</sub>**, presenta una estructura en bloques subangulares compactos, coloración 2.5YR 4/8, baja densidad de raíces y un 30-40% de pedregosidad. De igual manera, presenta fragmentos carbonizados.

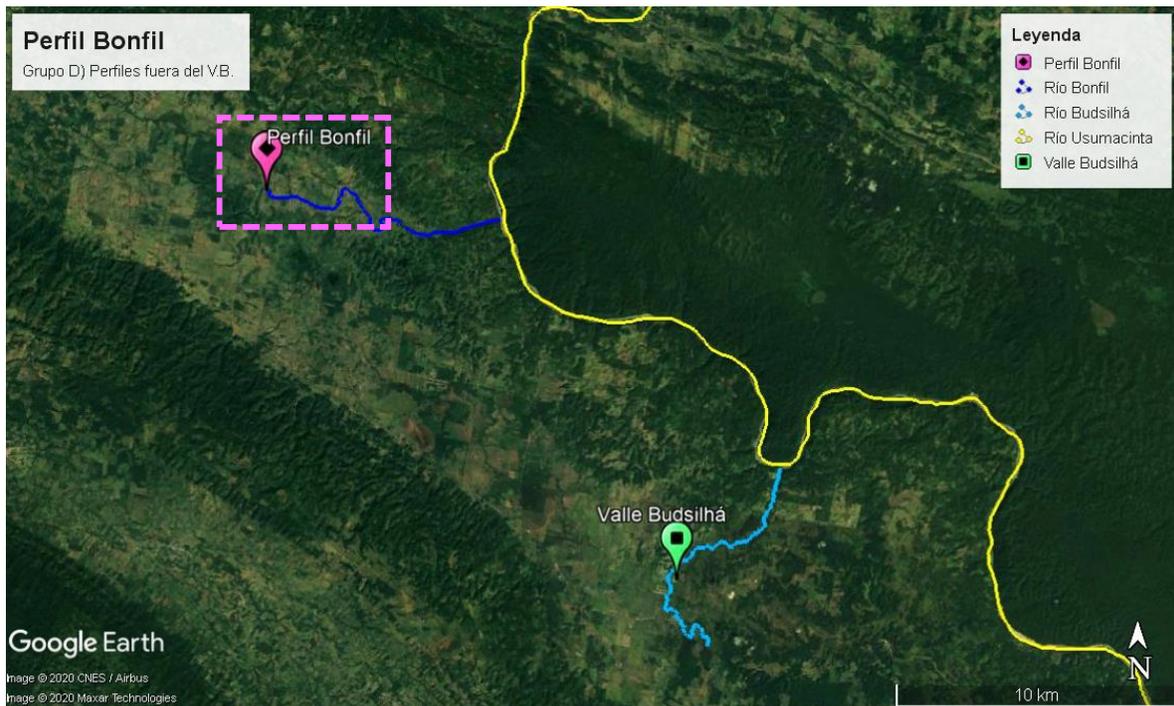
*Fig. 30 Perfil 3, sobre la loma de la Cantera Nueva Esperanza.*

## Grupo D) Perfiles fuera del Valle Budsilhá

### Bonfil

El primer perfil que integra este grupo es Bonfil, realizado en 2018, se encuentra a >10 km al noroeste del Valle Budsilhá (Fig. 31). Presenta características contrastantes a los suelos encontrados en el Valle Budsilhá, debido a su ubicación en una terraza aluvial (N17°14'47.76", E91°30' 51). Muestra poco desarrollo pedológico, debido a su cercanía a un río, se han depositado varios paquetes de sedimentos (Fig. 32).

Sin embargo, destaca la presencia de un suelo sepultado (2A), en el que se observa material cultural, como cerámica (Fig. 33). Este suelo fue clasificado como un *Fluvisol (Epi-Technic)*.



**Fig. 31** Ubicación del perfil Bonfil

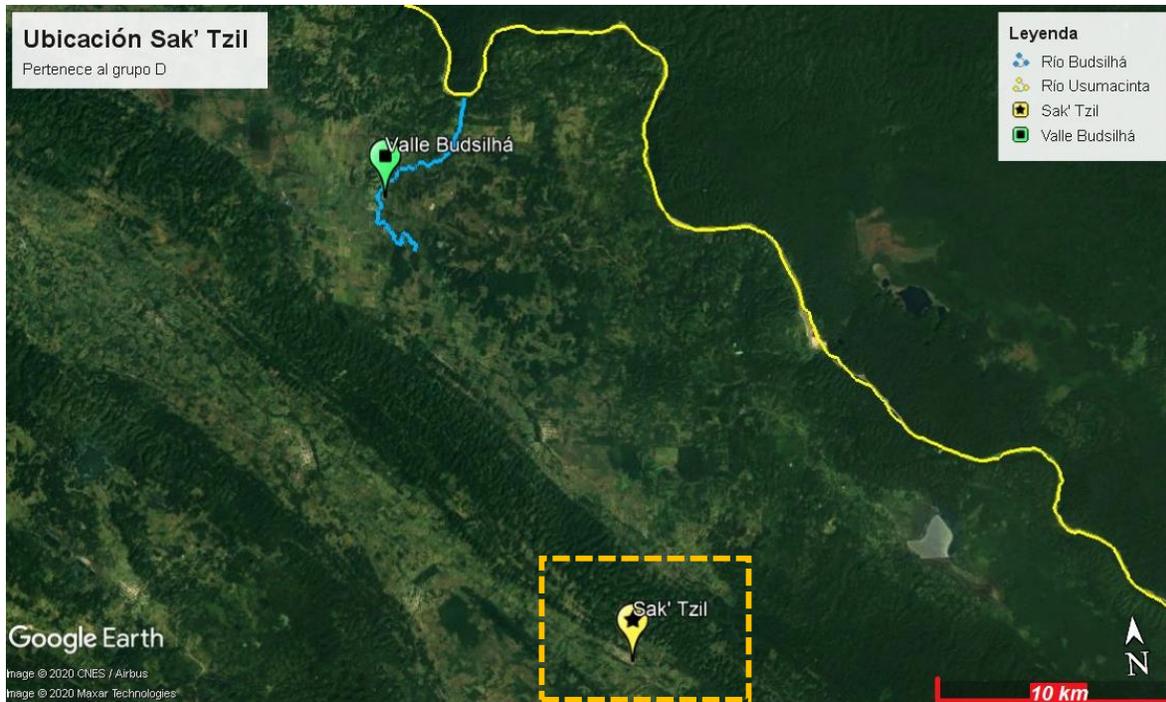


**Fig. 32** Perfil Bonfil



**Fig. 33** Fragmento de cerámica en el horizonte 2A

Los siguientes perfiles se encuentran cerca del sitio arqueológico *Sak' Tzil*, perteneciente al Periodo Clásico, en el poblado *Lacanjá Tzeltal* (Fig. 34), a >10 km de distancia del Valle Budsilhá.



**Fig. 34** Localización del sitio arqueológico *Sak' Tzil*,

Se describieron dos perfiles; el primero localizado en la barranca de un río, en donde se observó el afloramiento de travertino, denominado Sak-1 (N16°56'42'', E91°19'18'', 476 msnm), con un espesor de casi 2 m, con varios ciclos de sedimentación y pocos de pedogénesis, ubicados en la zona inferior (Fig. 35). Clasificado como un *Fluvisol*.



**0-40 cm, C.** Sedimento poco estructurado con fragmentos de travertino.

**40-100 cm, 2C.** Sedimento coluvial, sin estructura.

**100-160 cm. Horizonte 3A,** estructura en bloques subangular que rompe en granular, color 2.5Y 5/4 pardo, con abundantes raíces, de carácter coluvial.

**160-177 cm, 4C<sub>1</sub>.** Sedimento de color pardo amarillento, de textura arcillo-limosa, con un 70% de gravas de travertino.

**177-215 cm, 4C<sub>2</sub>.** Sedimento arcillo-limoso, similar al anterior, pero con un 30% de gravas de travertino. En los últimos 10 cm, está ligeramente estructurado con colores más oscuros.

**215-232 cm, 4C<sub>3</sub>.** Sedimento de fragmentos de travertino intemperizado.

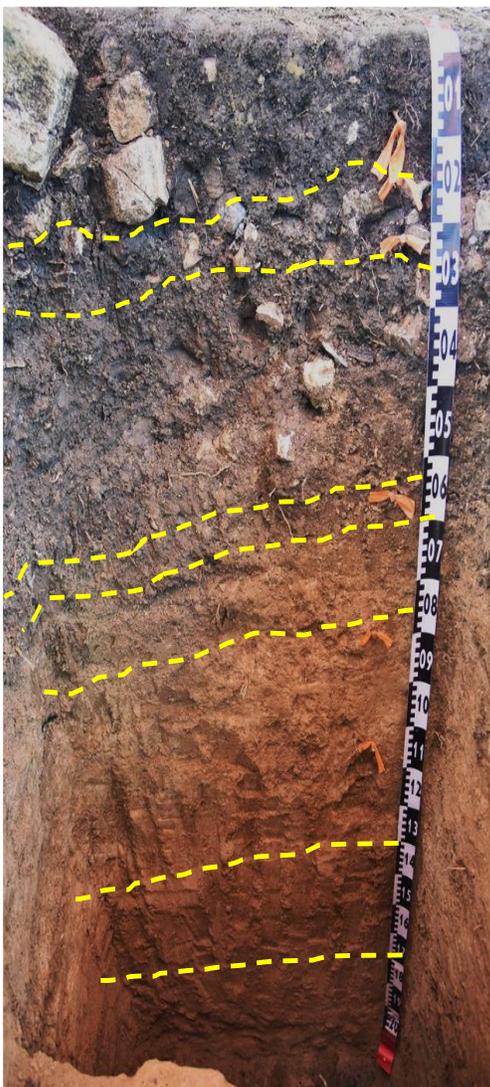
**232-260 cm, 5C.** Sedimento compacto y arenoso de color pardo amarillento, con gravas de travertino.

**260-270 cm Horizonte 6Ag,** estructura en bloques subangulares, color 2.5YR 6/3 pardo grisáceo, textura limosa y presencia de motas rojas.

**270-290 cm Horizonte 6Bg,** estructura en bloques subangulares, color 2.5YR 6/2 parda, textura limosa, presencia de manchas anaranjadas

*Fig. 35 Perfil Sak-1, dentro del sitio arqueológico Sak Tzil en la orilla del río*

El siguiente perfil, Operación 7A, forma parte del sitio arqueológico *Sak' Tzil*, con coordenadas: N16° 56'34.5", E19°18.2'47", a 476 msnm. Es un perfil, cuya parte superior muestra fuerte perturbación antrópica (Fig. 36), mientras que a profundidad está conformado por sedimentos principalmente de travertino, sin rasgos significativos de pedogénesis.



**0 - 15 cm. Horizonte Ap**, con estructura en bloques angulares, color 7.5YR 3/1, textura limo-arcillosa.

**15-22 cm. Piso maya (1)**, conformado por lascas de calizas. La matriz es de color pardo oscuro y muestra edafogénesis.

**22-65 cm.** Fragmentos de piso maya (2), con abundantes artefactos (carbón, cerámica). La matriz es de color pardo oscuro.

**65-68 cm, C.** Línea de gravas subredondeadas de travertino.

**68-75 cm, 2C.** Sedimento arcilloso, color 7.5YR 5/4, sin presencia de material cultural.

**75-130 cm, 3C1.** Sedimento limoso con cierto grado de estructuración, con abundantes fragmentos de travertino. Tiene la apariencia de un pedo-sedimento.

**130-170 cm, 3C2.** Sedimento limo-arenoso con abundantes fragmentos de travertino. Destaca la presencia de lombrices en este nivel. Se presentan abundantes fragmentos de travertino con muestras de disolución, además de fragmentos de mayor tamaño, más frescos.

**170 - 230 cm, 4C.** Sedimento masivo, limo-arenoso, con presencia de rasgos gléyicos, como manchas ocre, gris claras y pardas.

**>230 cm.** Travertino, con fuerte reacción al HCl.

*Fig. 36 Perfil Sak-2 Operación arqueológica 7A*

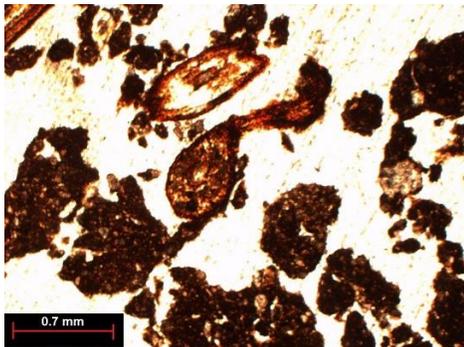
## 5.2 Análisis micromorfológico

La micromorfología que se presenta está enfocada a rasgos más sobresalientes de los perfiles anteriormente descritos.

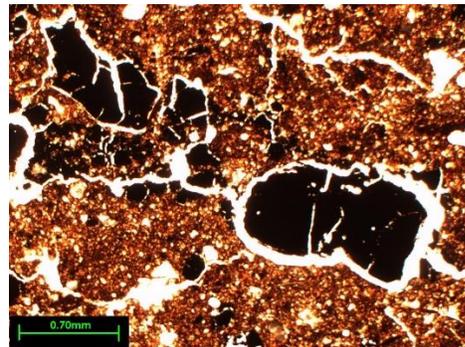
### Perfil María

En el horizonte Ah<sub>2</sub> del perfil María se encuentran rasgos relacionados con los procesos de humificación: estructura granular de color pardo rojiza con alta porosidad y restos vegetales parcialmente descompuestos (Figura 37, a). En el horizonte B, se encuentran abundantes materiales de origen antrópico, como fragmentos de carbón, concha y hueso (Figs. 37, b, c y d), así como fragmentos redondeados de suelo rojo, el cual es isotrópico a nicules cruzados (Fig. 37, e). Mientras que, el horizonte BC muestra una matriz de suelo arcillosa, con fragmentos de caliza y zonas de recristalización con calcita esparítica (Fig. 37, f).

a)



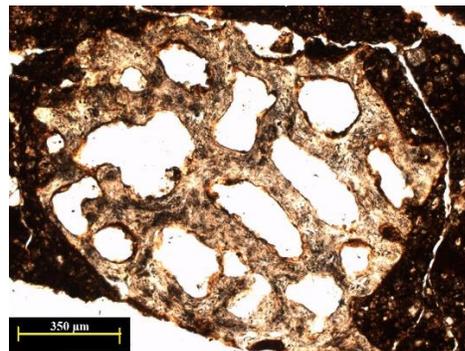
b)



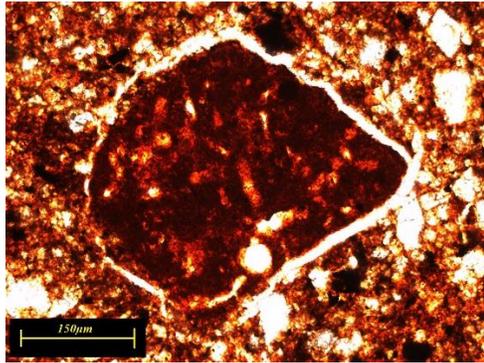
c)



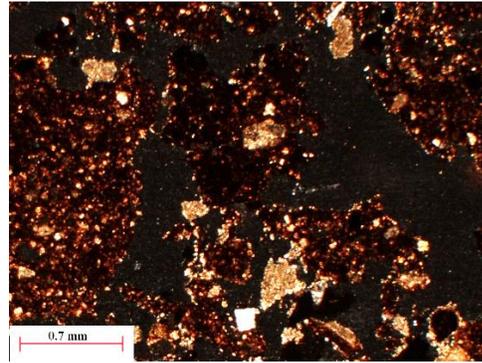
d)



e)



f)

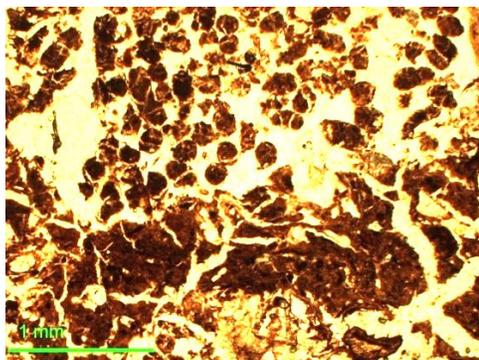


**Fig. 37 Micromorfología del perfil María:** horizonte Ah2, **a)** Estructura granular, luz natural (LN); horizonte B, **b)** fragmentos de carbón, LN; **c)** fragmento de concha, nicoles cruzados (NX); **d)** fragmento de hueso, LN; horizonte BC: **e)** estructura en bloques subangulares, LN, **f)** fragmentos rodeados de carbonatos esparíticos (NX).

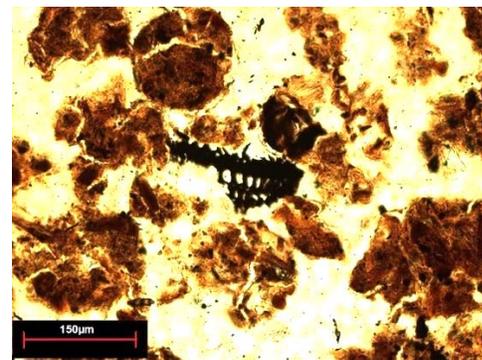
### Perfil Pantano María

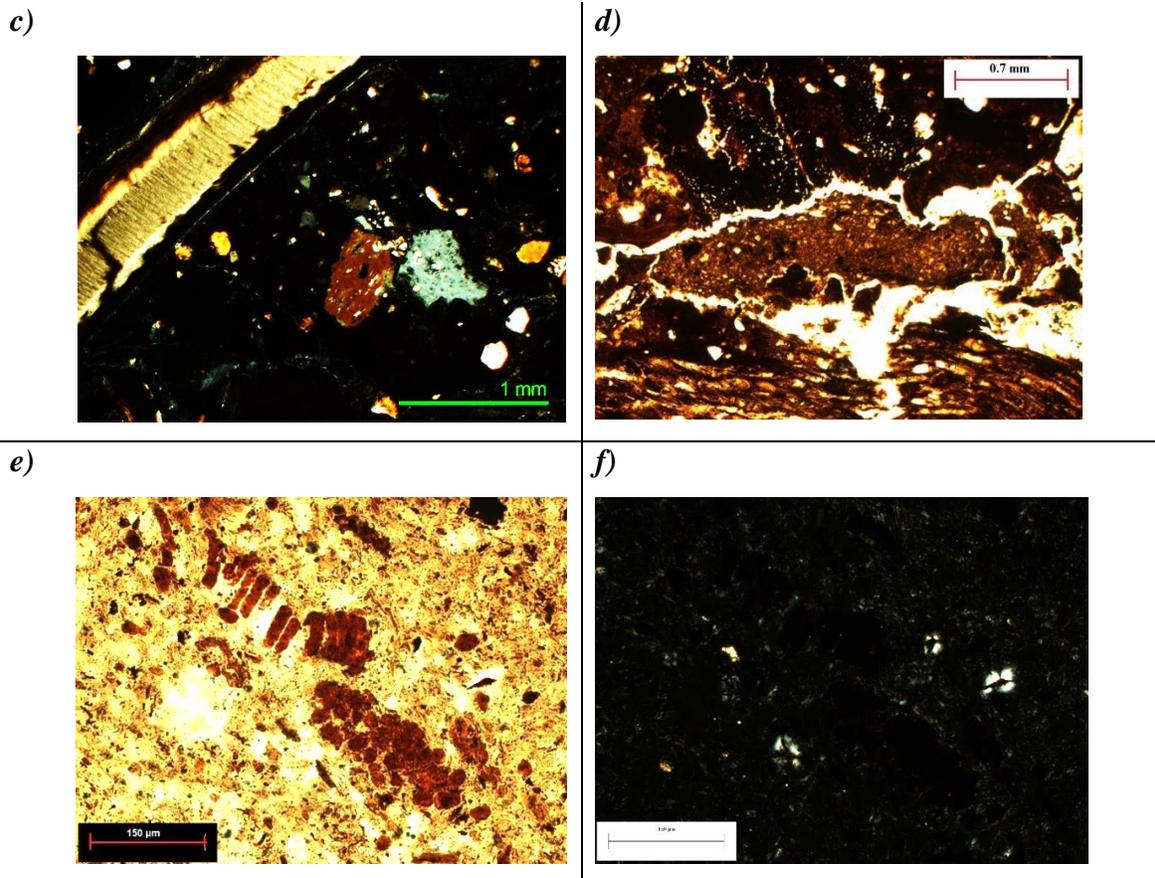
En este perfil se observa una estructura granular en el horizonte Ahg1 (Fig. 38, a), con presencia de raíces y algunos fragmentos de carbón (Fig. 38, b). Mientras que el horizonte Cg también muestra algunos fragmentos de conchas y principalmente fragmentos minerales carbonatados, así como fragmentos de carbón y raíces no frescas (Figs. 38, c y d). Por último, el horizonte 2Ahg muestra una matriz casi homogénea, con fragmentos vegetales altamente descompuestos, los cuales a nicoles cruzados son isotrópicos (Figs. 38, e y f).

a)



b)

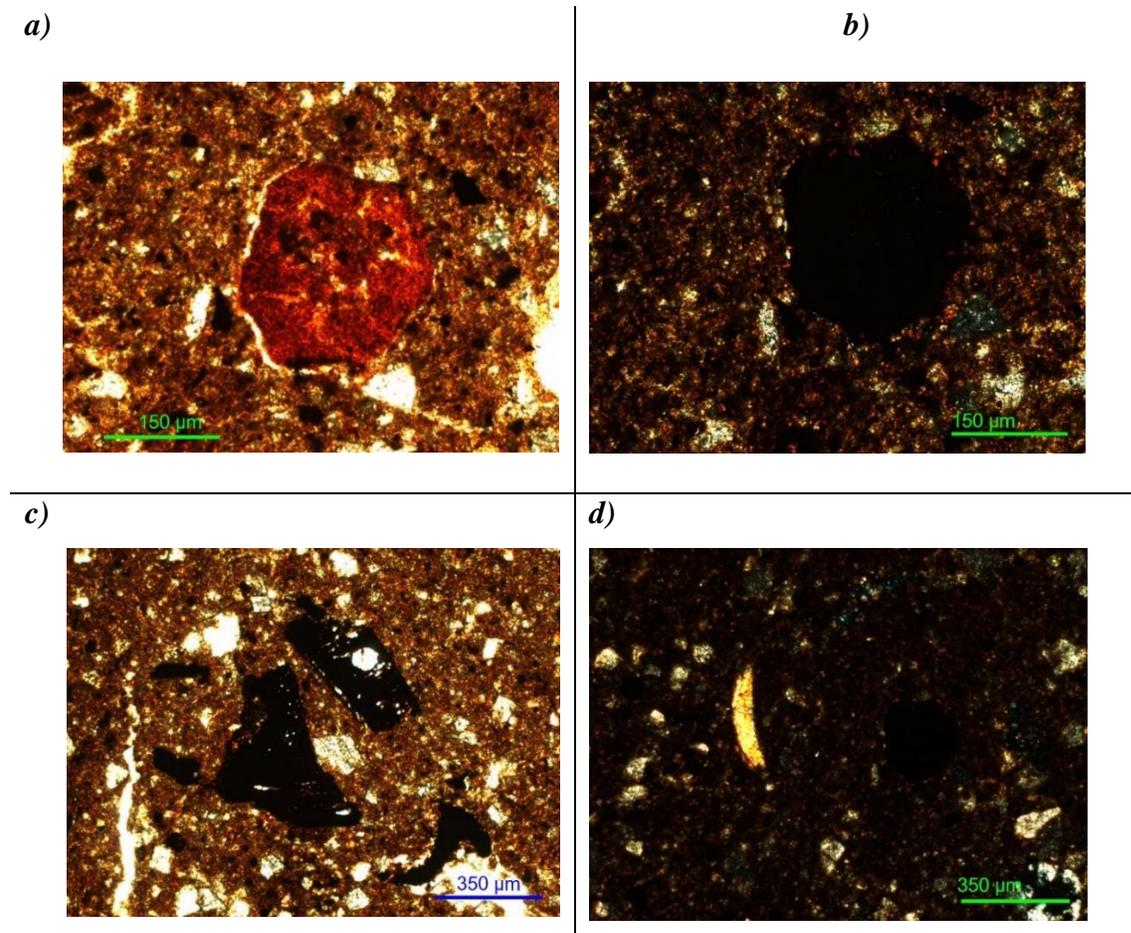




**Fig. 38 Micromorfología del perfil Pantano María:** horizonte Ahg1: *a*) estructura granular (LN); horizonte Ah2: *b*) fragmento de carbón (LN); horizonte Cg, *c*) fragmento de concha y fragmentos minerales(NX); *d*) fragmentos de carbón y raíces en matriz arcillosa (NX); horizonte 2Ahg: *e*) restos vegetales altamente descompuestos, LN; *f*) fragmentos rojos subredondeados isotrópicos (NX).

## Perfil Ladera Budsilhá

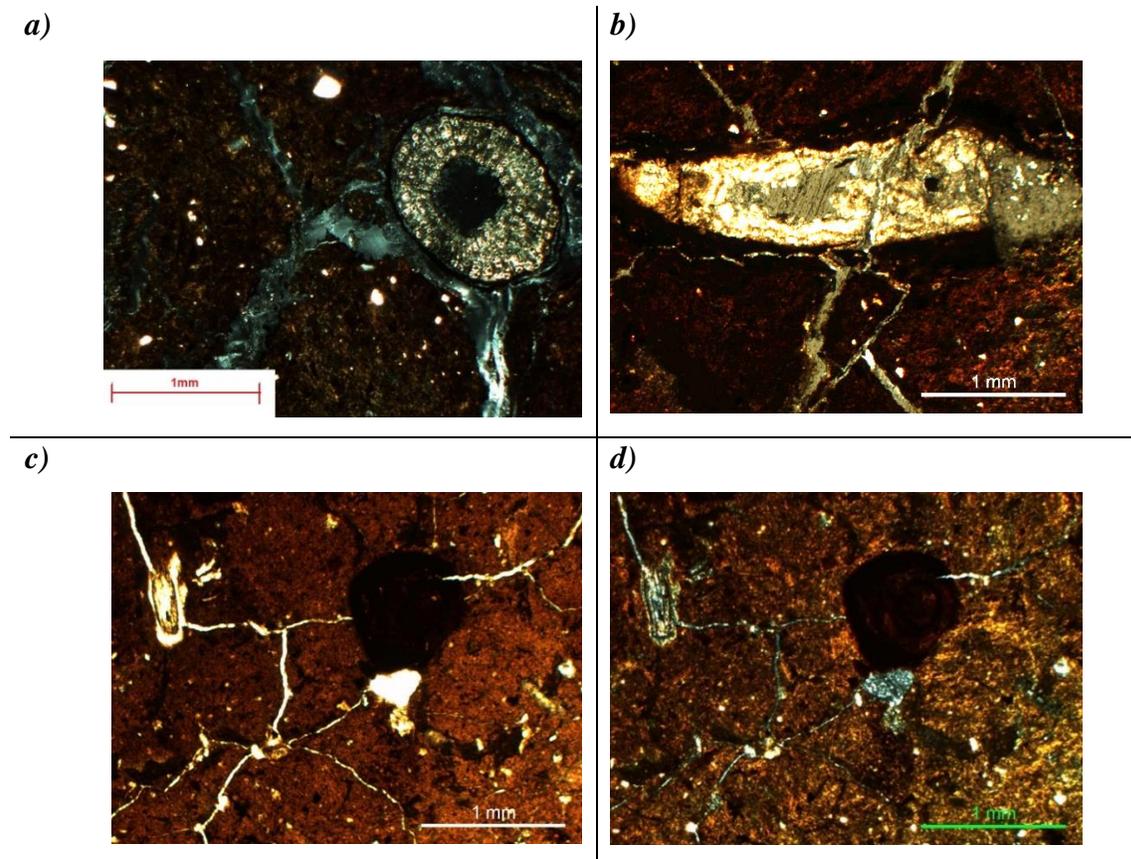
La micromorfología de este perfil, mostró rasgos de interés para la génesis de los suelos, ya que se encontraron fragmentos retrabajados de suelo rojo (Fig. 39, a), dentro de una matriz carbonatada, los cuales no muestran birrefringencia (Fig. 39, b). Así como fragmentos de carbón (c) y algunas partículas arcillosas alargadas en la matriz (d).



*Fig. 39 Micromorfología del perfil Ladera Budsilhá: horizonte AB, a), fragmento rojo de suelo retrabajado (LN), b) mismo fragmento que (a), muestra la matriz birrefringente de carbonatos (NX); c) fragmentos vegetales carbonizados (LN), d) fragmento posiblemente arcilloso que muestra alta birrefringencia, en comparación a su matriz carbonatada (NX).*

## Perfil Pantano Budsilhá

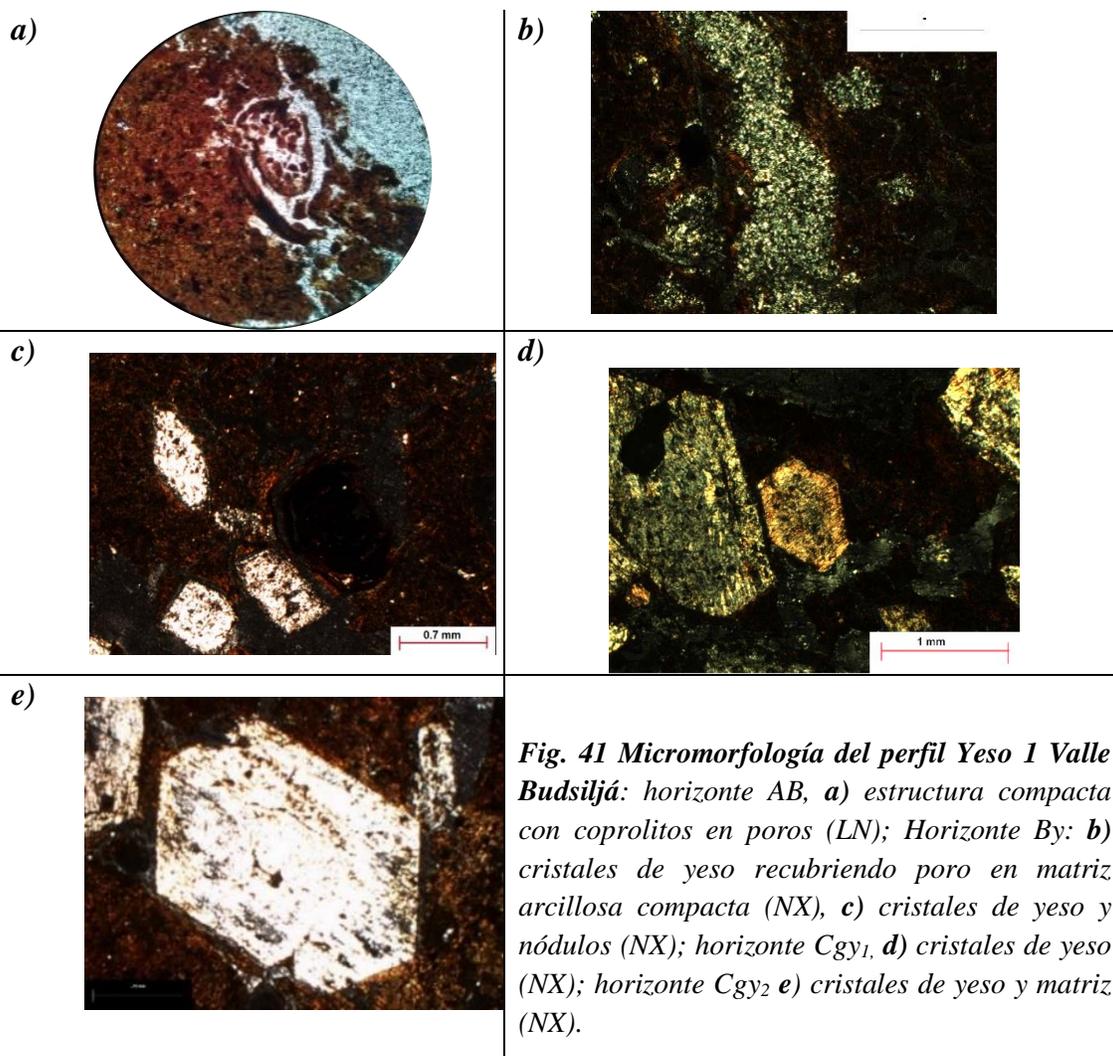
Este perfil muestra en general una matriz arcillosa en la cual se pueden encontrar fragmentos frescos de raíces en el horizonte superficial Ag, con una estructura en bloques subangulares (Fig. 40, a). Mientras que el horizonte C, presenta fragmentos grandes de roca carbonatada, así como nódulos de Mn y Fe, producto de procesos de óxido reducción, los cuales yacen en una matriz arcillosa (Figs. 40, b, c y d)



**Fig. 40** *Micromorfología del perfil Pantano Budsilhá: horizonte Ag: a) estructura subangular y raíces (NX); horizonte Cg: b) fragmento de caliza subangular (LN), c) estructura subangular y nódulo de Mn y Fe, (LN); d) misma que (c) con (NX).*

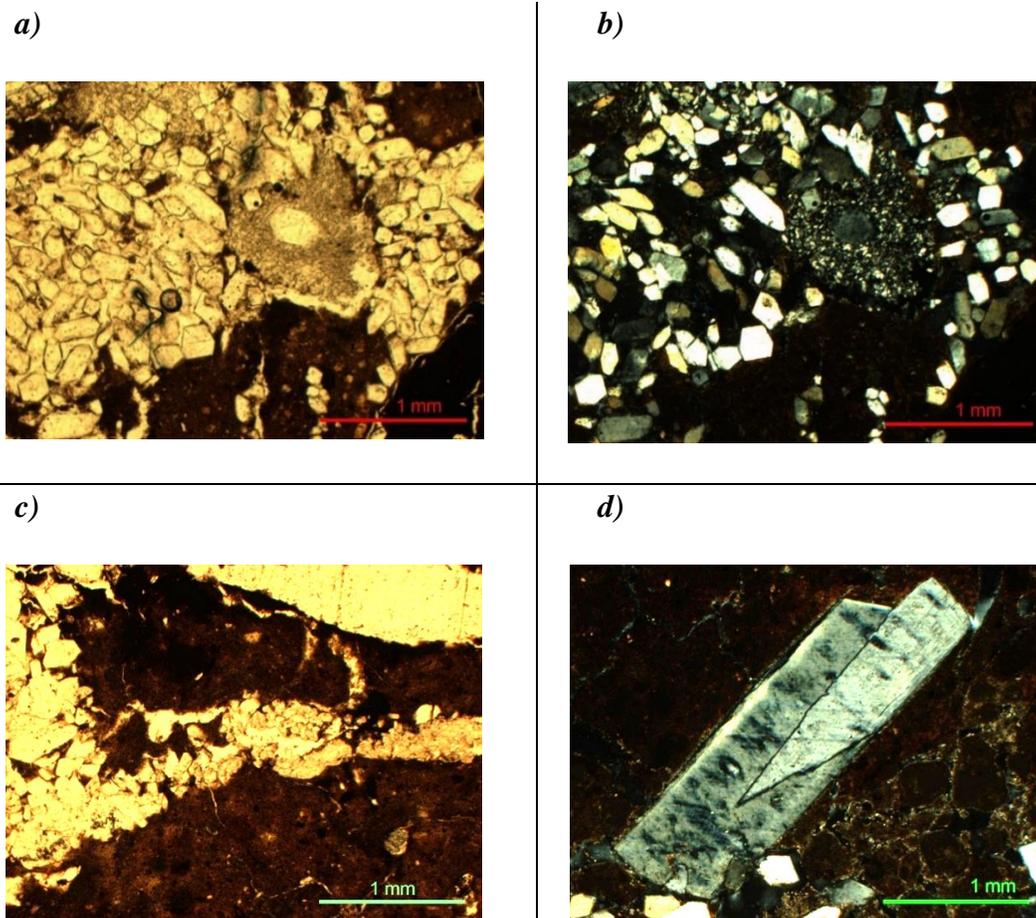
## Perfil Yeso 1

La micromorfología del horizonte AB del Perfil Yeso 1 (Valle Budsilhá) muestra una estructura en bloques subangulares, moderadamente compacta, con fragmentos de material vegetal descompuesto y restos de coprolitos en los poros (Fig. 41, a). A partir del horizonte By, se aprecian claramente los cristales de yeso que también rellenan los poros y canales (Fig. 41, b). De igual manera es posible encontrar nódulos de Fe y Mn, rodeados de una matriz arcillosa (Fig. 41, c). Mientras que en el horizonte Cg, los cristales son abundantes y de mayor tamaño, que en los horizontes superiores (Figs. 41, d y e).



## Perfil Yeso 2

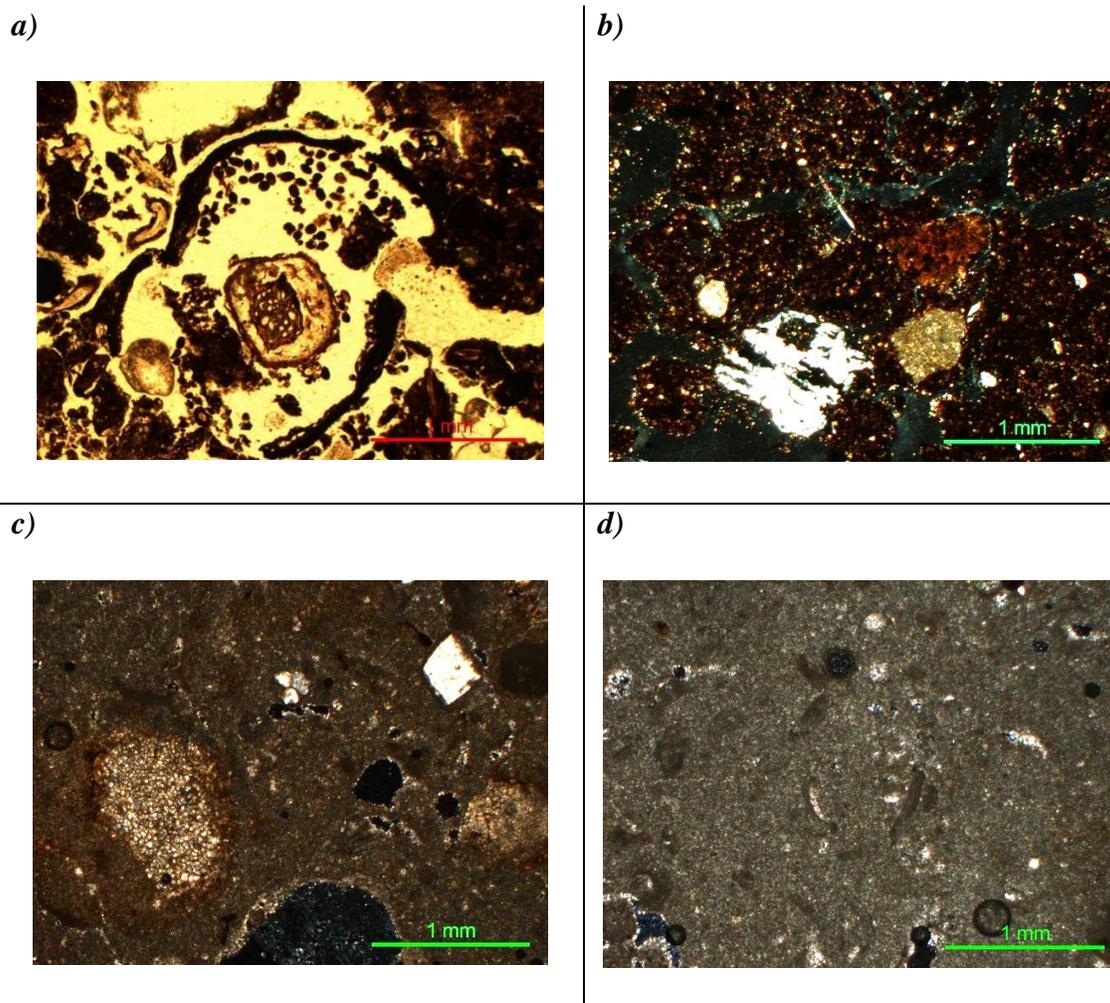
El perfil Yeso 2 muestra características similares al perfil Valle Budsilhá. Sin embargo, su principal diferencia radica en la morfología de los cristales y su abundancia. La mayoría de los cristales se encuentran rellenando los poros de la matriz arcillosa del suelo (Figs. 42, a, b y c), e incluso con un intercrecimiento de cristales, sobre otros (Fig. 42, d), lo cual nos indica un alto contenido de sulfatos que reprecipitan en la matriz del suelo.



**Fig. 42** *Micromorfología del perfil Yeso 2; horizonte Cgiy, a) clusters de cristales de yeso, con intercrecimientos de distintos tamaños (LN), b) misma figura que (a), muestra la birrefringencia de primer orden de los cristales de yeso (NX), c) matriz arcillosa del suelo, con crecimiento de cristales de yeso en un canal o poro (LN); horizonte Cgy, d) intercrecimiento de cristales de yesos (NX).*

### Perfil 1 (Cantera Nueva Esperanza)

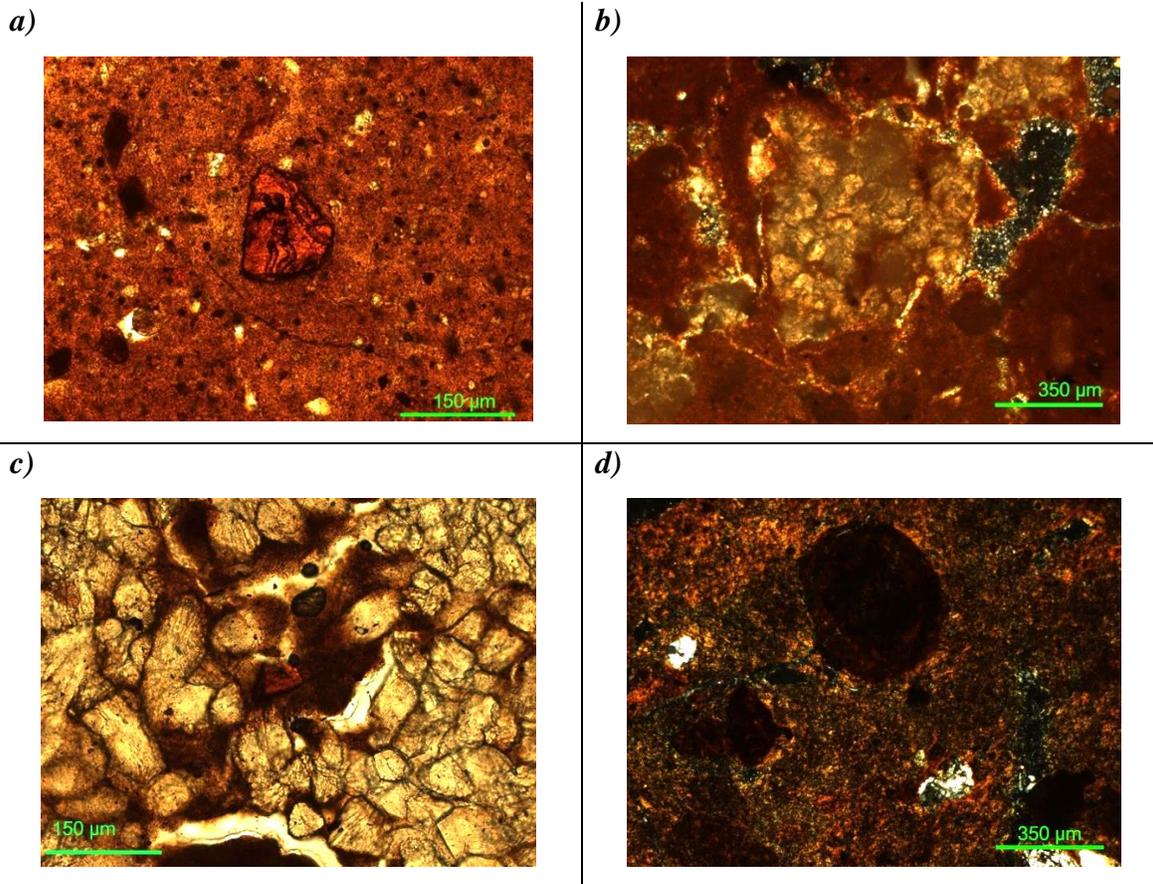
Este perfil muestra la pedogénesis normal en un perfil desarrollado sobre rocas calizas. Hay abundantes restos vegetales como raíces, fragmentos de tejidos en descomposición y coprolitos (Fig. 43, a). En el horizonte Bw se presentan fragmentos alterados de roca y restos de suelos rojos arcillosos, formando pápulas (Fig. 43, b). El horizonte C muestra una roca saprolitizada (Fig. 43, c) que aún conservan algunos rasgos de carbonatos primarios, como fragmentos biogénicos (Fig. 43, d)



*Fig. 43 Micromorfología del Perfil 1 Cantera Nueva Esperanza; horizonte Ah, a) estructura granular con raíces frescas y coprolitos (LN); horizonte Bw, b) matriz carbonatada y fragmentos minerales (NX); horizonte C, c) matriz calcárea alterada (NX), d) matriz calcárea y biogénica (NX).*

## Rellenos 1 y 2

Estos rellenos presentan características similares entre ellos, como los fragmentos rojos isotrópicos encontrados en una matriz arcillosa (Figs. 44, a y c). Mientras que también se presentan fragmentos de calizas saprolitizadas, rodeados de una matriz roja y arcillosa (Figs. 44, b y c). La principal diferencia radica en el Relleno 2 (Fig. 44, d), donde podemos observar nódulos de Mn y Fe en una matriz arcillosa.

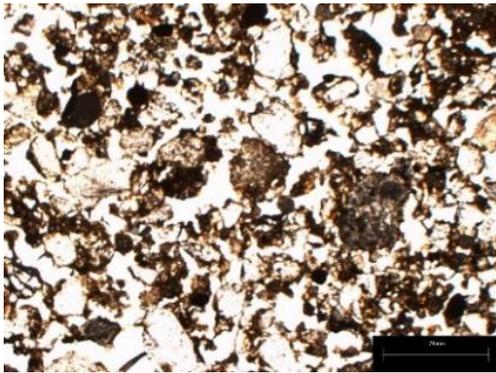


**Fig. 44** *Micromorfología de los Rellenos 1 y 2; Relleno 1, a) matriz arcillosa, con fragmentos más rojos e isotrópicos (LN), b) carbonatos alterados, en una matriz arcillosa (NX); Relleno 2, c) fragmento de caliza saprolitizada y fragmentos rojos isotrópicos (LN), d) matriz arcillosa y nódulo de Mn y Fe (NX).*

## Perfil Bonfil

En este perfil, en el horizonte 2A se observa una estructura granular bien desarrollada con textura arenosa, en donde dominan fragmentos de caliza y cuarzo, con abundantes conchas (Figs. 45, a y b). El horizonte 2C tiene una textura más gruesa en donde se aprecian granos de cuarzo subredondeados, con abundantes fragmentos de concha (Figs. 45, c y d).

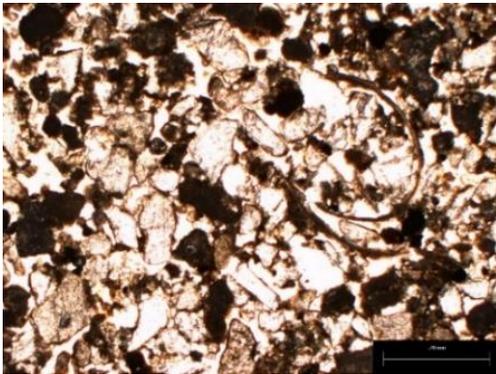
a)



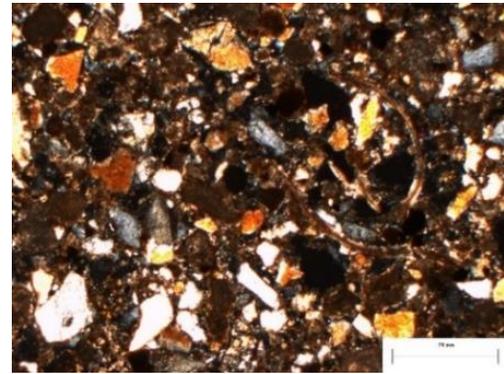
b)



c)



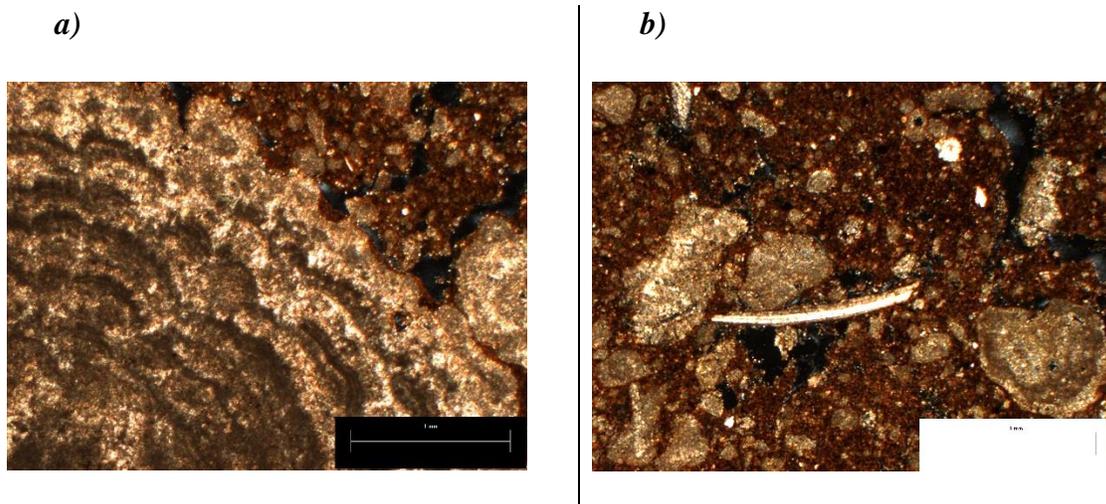
d)



**Fig. 45** *Micromorfología del perfil Bonfil: horizonte 2Ab, a) estructura granular con textura arenosa, (LN); b) fragmento de concha en una matriz gruesa con fragmentos de caliza, NX; Horizonte 2C: c) textura arenosa con fragmentos de concha (LN); d) misma que c, pero con NX.*

## Perfil Sak – 1

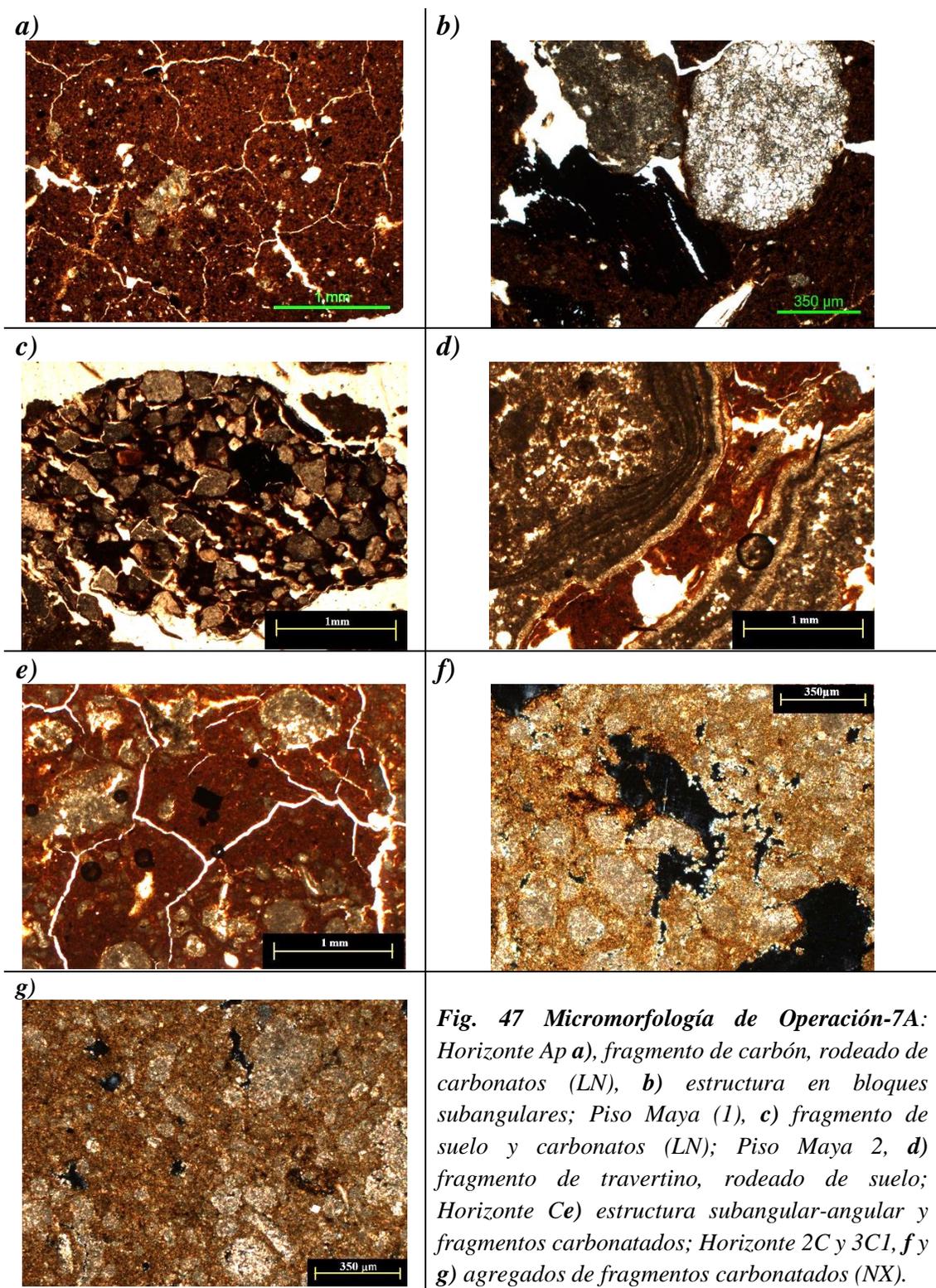
Este perfil muestra la sedimentación natural de un río, aunque también es posible encontrar fragmentos pertenecientes a una acumulación cíclica de carbonatos, como se muestra en la figura 46, a. De igual manera es posible encontrar fragmentos de sueltos de travertino en una matriz carbonatada, con otros fragmentos de concha (Fig. 46, b)



*Fig. 46 Micromorfología del perfil Sak – 1; a) formación tipo estromatolito de carbonatos (NX), b) Fragmentos de concha y travertino en una matriz carbonatada (NX).*

## Perfil Sak – 2 Operación 7 - A

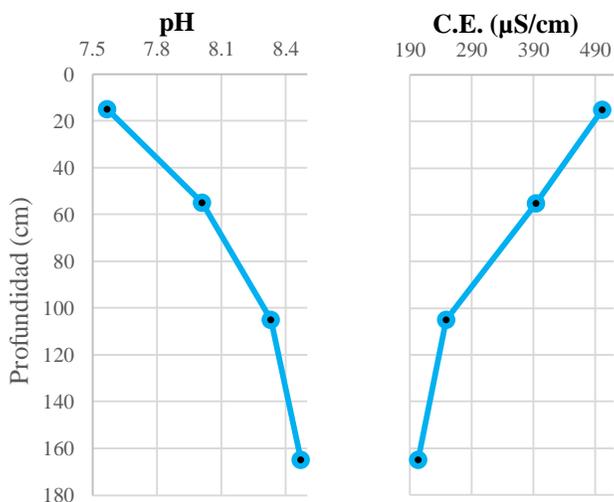
Este perfil muestra una secuencia de carbonatos tipo travertino, con algunas variaciones. El horizonte Ap, muestra una estructura de suelo subangular (Fig. 47, a). Así como, fragmentos de carbón y calizas (Fig. 47, b). En la figura 47, c, Piso maya (1) muestra agregados de un suelo oscuro con fragmentos carbonatados. Así como, fragmentos de travertino. La siguiente capa Fragmentos de Piso Maya (2) (Fig. 47, d), muestra una repetición de fragmentos de travertino, rodeado de un suelo marrón arcilloso. El siguiente horizonte C (Fig. 47, e) tiene una estructura en bloques subangulares, con fragmentos de roca carbonatada. La siguiente capa 2C (Fig. 47, f) posee agregados de fragmentos carbonatados, rodeados de una capa fina de suelo arcilloso. Finalmente, la capa 3C1, es similar a la capa 2C, pero más compacta, con fragmentos carbonatados.



**Fig. 47 Micromorfología de Operación-7A:** Horizonte Ap **a)** fragmento de carbón, rodeado de carbonatos (LN), **b)** estructura en bloques subangulares; Piso Maya (1), **c)** fragmento de suelo y carbonatos (LN); Piso Maya 2, **d)** fragmento de travertino, rodeado de suelo; Horizonte Ce) estructura subangular-angular y fragmentos carbonatados; Horizonte 2C y 3C1, **f)** y **g)** agregados de fragmentos carbonatados (NX).

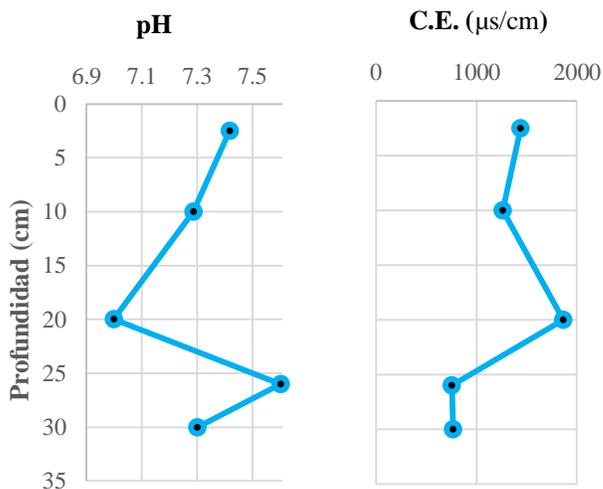
### 5.3 Resultados analíticos

A continuación, se presentan el pH y la Conductividad Eléctrica (C.E.) de los perfiles estudiados. Los resultados del perfil María se presentan en la figura 48. El pH en los horizontes superficiales muestra una reacción moderadamente alcalina, que aumenta con la profundidad. Mientras que la C.E. tiene un comportamiento contrario al pH, teniendo los valores más altos en superficie y disminuyendo a profundidad



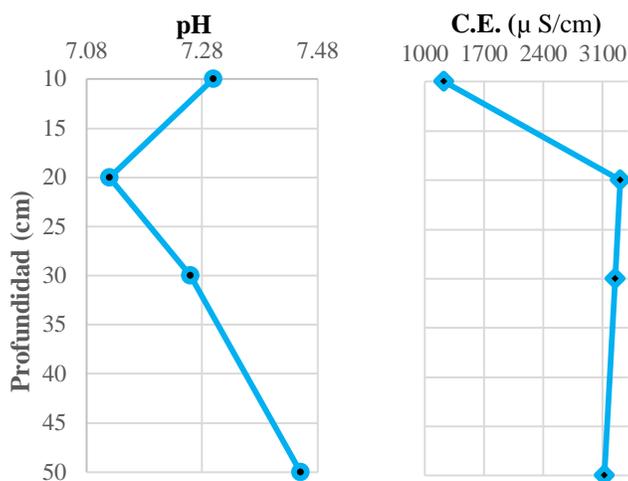
*Fig. 48 pH y C.E. del Perfil María*

Por otro lado, los resultados del Perfil Pantano María (Fig. 49) muestran un pH neutro, variando a ligeramente alcalino en los horizontes inferiores. En cuando a los valores de C.E. son mucho más altos que en el perfil María, aumentando a 2000 µS/cm a una profundidad de 20 cm, donde el pH disminuye.



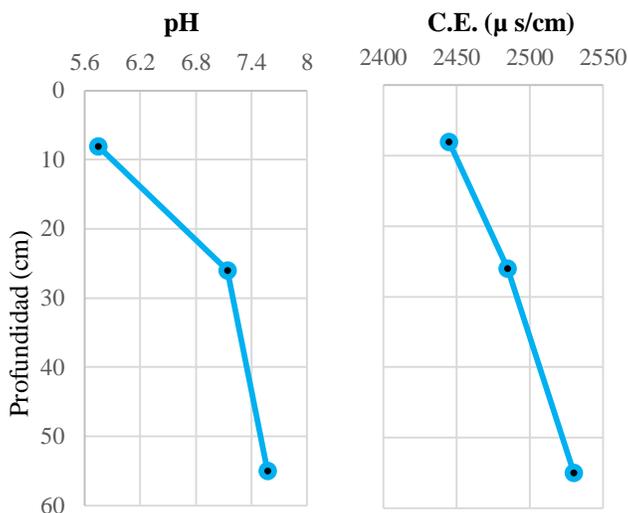
*Fig. 49 pH y C.E del Perfil Pantano María*

El perfil Yeso-1 Valle Budsilhá, posee valores de pH neutros a ligeramente alcalino, conforme se incrementa la profundidad (Fig. 50). En el caso de la C.E., se aprecia que los valores son más altos que en los perfiles anteriores ( $>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), incrementándose hasta  $3100 \mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que puede explicar la presencia de cristales de yeso.



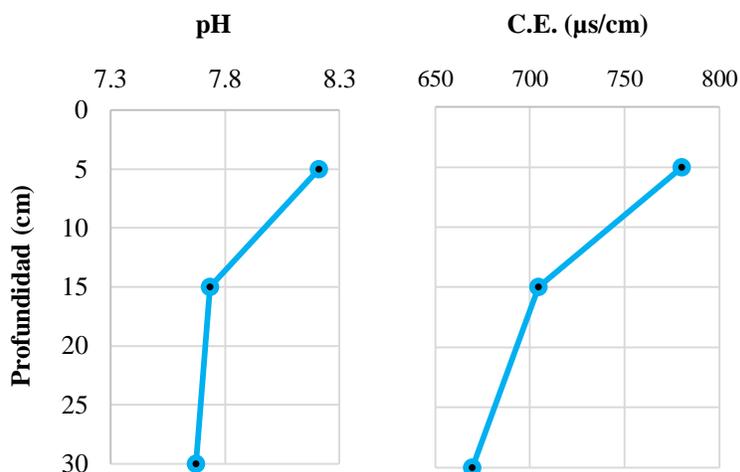
*Fig. 50 pH y C.E., Yeso 1, Valle Budsilhá, 2018*

El Perfil Yeso-2 muestra valores de pH y la C.E. con patrones similares: en superficie es ligeramente ácido con valores menores de C.E. que aumentan con la profundidad (Fig. 51).



*Fig. 51 pH y C.E. Perfil Yeso-2, Valle Budsilhá, 2019.*

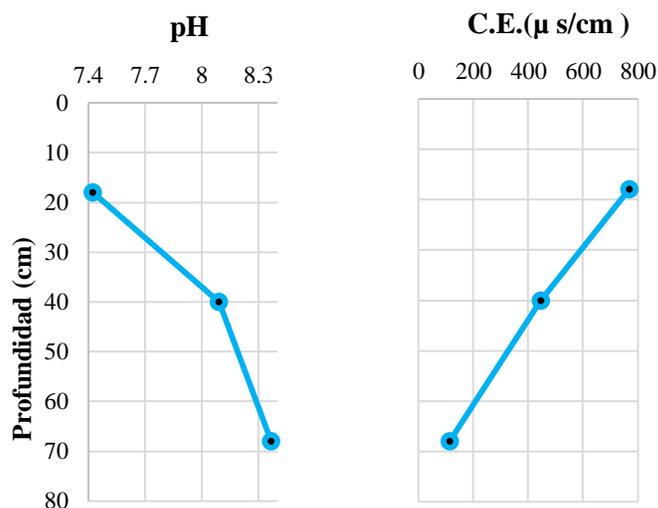
El Perfil Ladera Budsilhá muestra valores de pH neutros y C.E. alta en los dos horizontes estudiados (Fig. 52).



*Fig. 52 pH y C.E. del perfil Ladera Budsilhá*

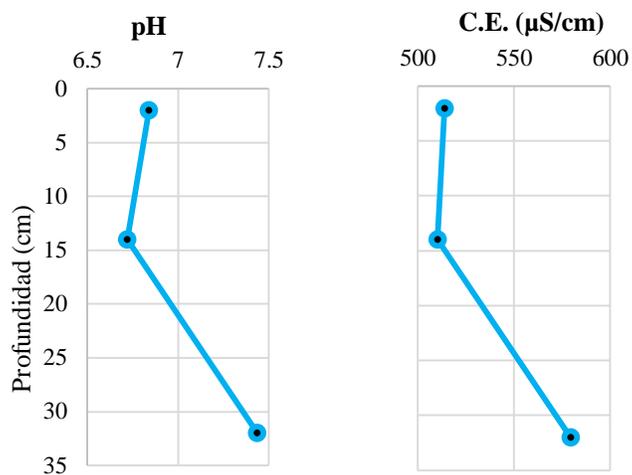
Los resultados de pH y C.E. de los perfiles ubicados en la Cantera Nueva Esperanza se muestran a continuación.

Como podemos observar el Perfil 1, muestra valores ligeramente alcalinos que aumentan con la profundidad. Sin embargo, la C.E. disminuye conforme aumenta la profundidad, con valores altos en superficie de casi 800  $\mu$  s/cm (Fig. 53, debido a la quema superficial de los suelos locales).



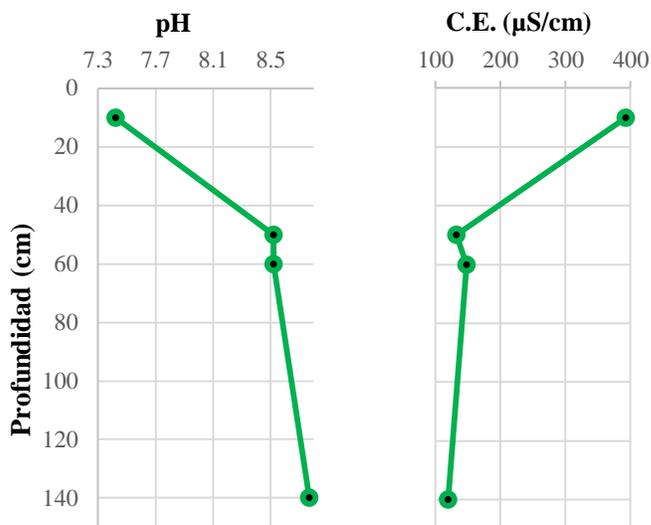
*Fig. 53 pH y C.E. Perfil 1, Cantera Nueva Esperanza*

El perfil 3, ubicado en la colina, muestra valores de pH ligeramente ácidos a neutros conforme aumenta la profundidad. La C.E. muestra el mismo patrón que el pH (Fig. 54).



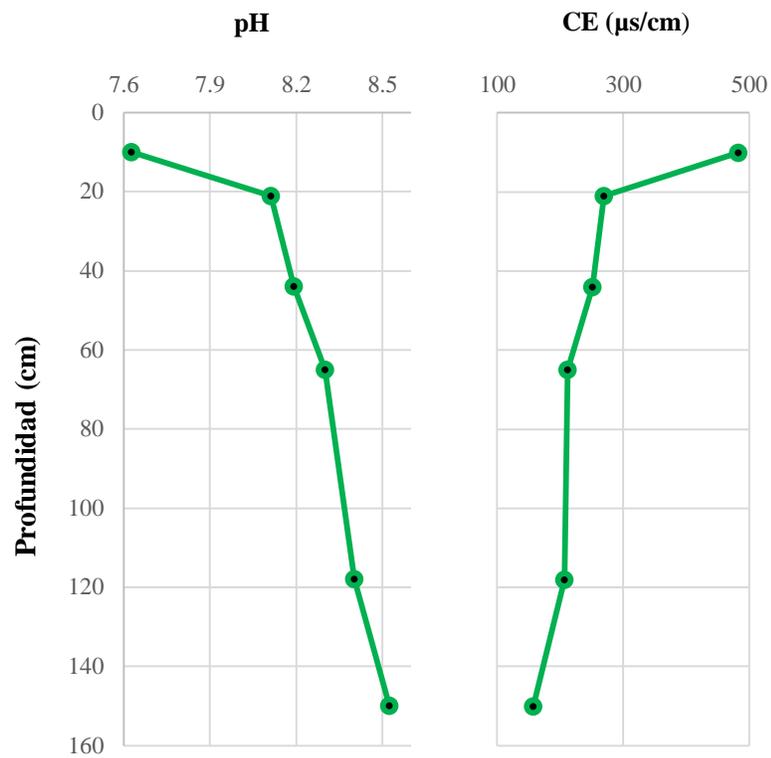
*Fig. 54 pH y C.E. Perfil 3, Cantera Nueva Esperanza*

En el perfil Bonfil tiene valores de pH de neutros a ligeramente alcalinos. Mientras que la C.E. disminuye conforme aumente la profundidad (Fig. 55). Destaca claramente, que en el horizonte 2A (horizonte cultural) los valores de pH son alcalinos (posiblemente por la presencia de fragmentos antrópicos como carbón y hueso).



*Fig. 55 pH y CE del perfil Bonfil*

El perfil Operación 7A posee valores de pH que van de ligeramente alcalinos a alcalinos con la profundidad. Mientras que la C.E. tiene un patrón contrario (Fig. 56), cuyos valores relativamente altos en superficies, probablemente se deban a efectos locales de quema.



*Fig. 56 pH y CE del perfil Operación 7A*

#### 5.4 Resultados de granulometría

El Perfil María tiene una textura moderadamente homogénea, con un predominio de fracciones de limo y arcilla. El horizonte B demuestra un ligero incremento en la fracción arcillosa (Fig. 57).

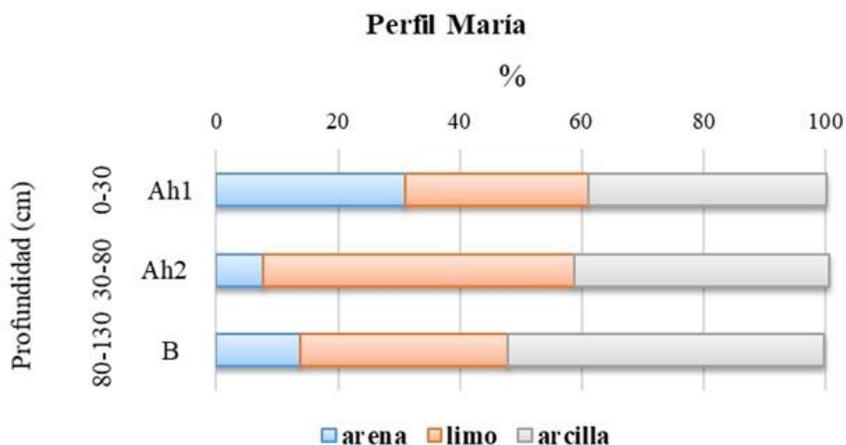


Fig. 57 Granulometría del perfil María

Por otro lado, en el Perfil Pantano María, predominan la fracción fina (arcilla) en todos los horizontes. Aunque, en los horizontes Cg y Agh1 hay un incremento en la fracción arena, en el que también se detectó un alto contenido de fragmentos de rocas (Fig. 58).

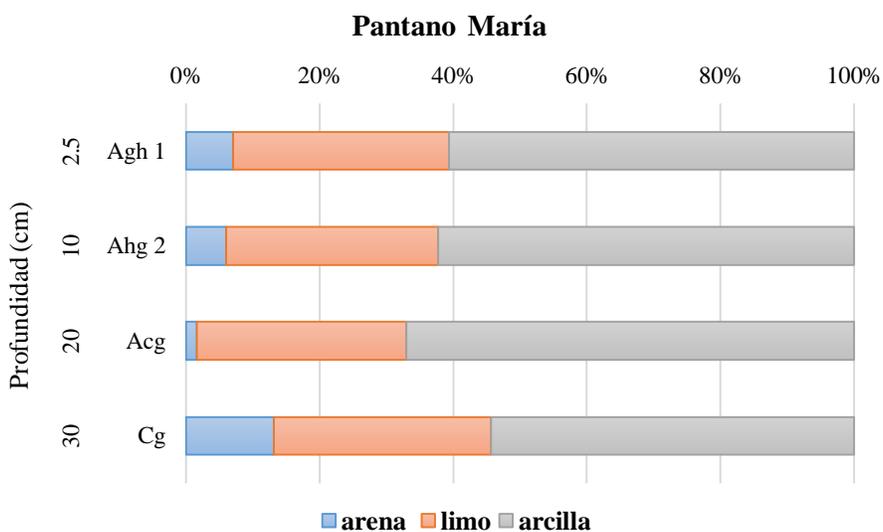
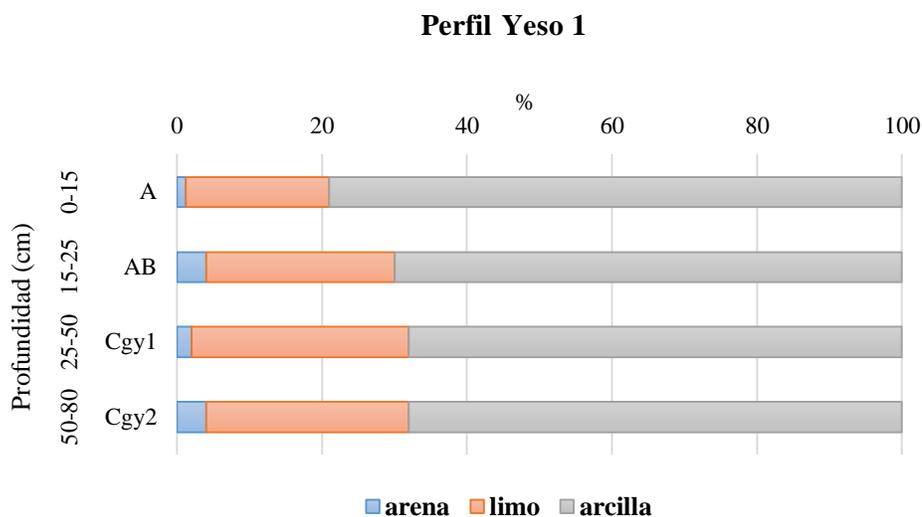


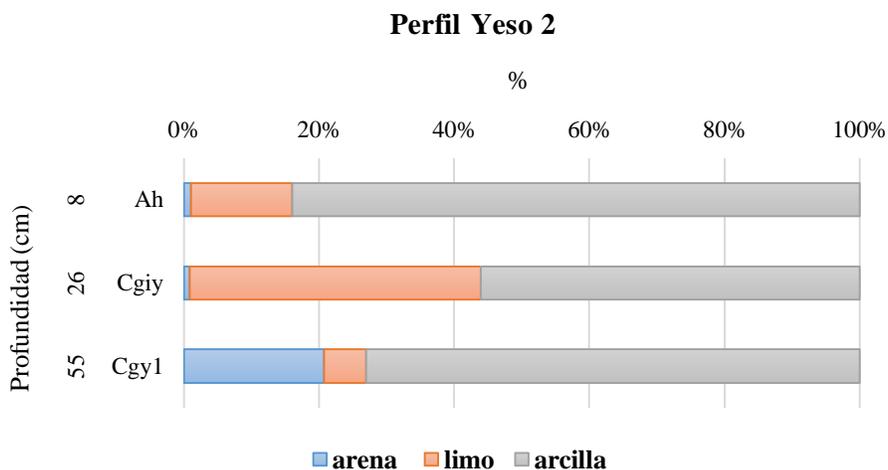
Fig. 58 Granulometría del perfil Pantano María

A diferencia, el Perfil Yeso 1 (Valle Budsiljá) presenta altos contenidos de arcilla y solo un bajo porcentaje de arena, compuesto principalmente por cristales de yeso (Fig. 59).



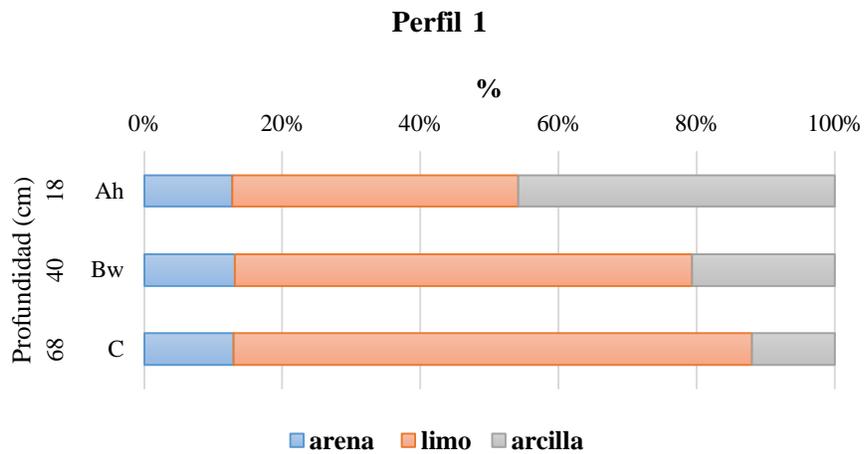
*Fig. 59 Granulometría del perfil Yeso 1*

El perfil Yeso-2 muestra una predominancia de la fracción fina. Sin embargo, en el horizonte inferior, se observa un aumento en el contenido de la fracción arena. Este porcentaje se debe al contenido de cristales de yeso que muestra el horizonte Cgy<sub>1</sub> (Fig. 60).



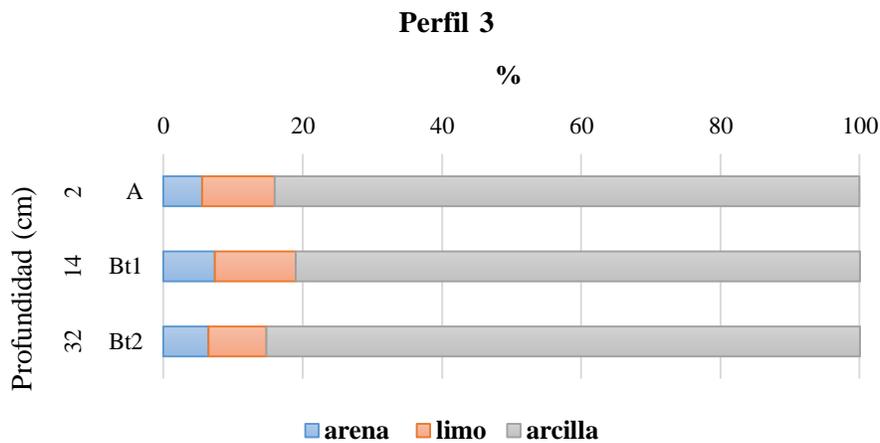
*Fig. 60 Granulometría del perfil Yeso 2*

El Perfil 1 (Cantera Nueva Esperanza) muestra un alto porcentaje de limo en todos los horizontes. Mientras que la fracción arcilla observa un decremento conforme aumenta la profundidad (Fig. 61).



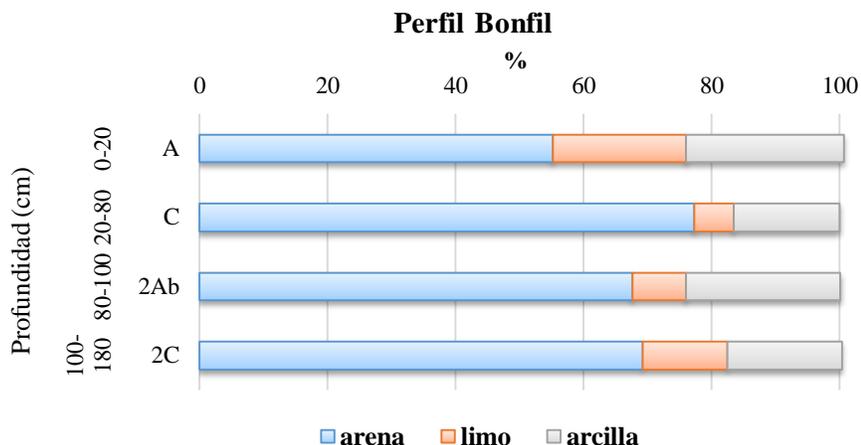
*Fig. 61 Granulometría del Perfil 1 Cantera*

En el perfil 3, podemos observar que predomina la fracción más fina, arcilla, en todos sus horizontes, prácticamente en las mismas proporciones. Aunque el horizonte Bt<sub>2</sub>, es ligeramente más arcilloso que sus horizontes superiores (Fig. 62).



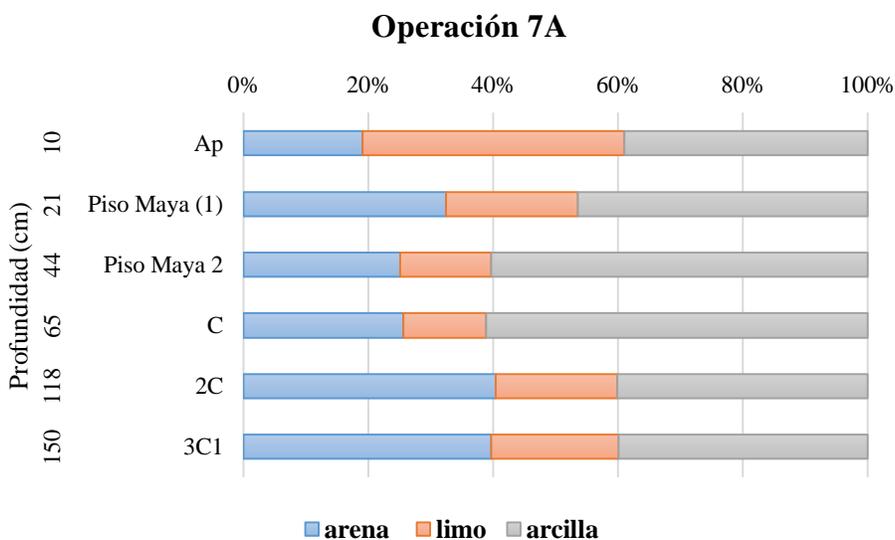
*Fig. 62 Granulometría del Perfil 3*

El perfil Bonfil muestra una gran diferencia respecto a los perfiles anteriores, ya que en los diferentes horizontes domina en más de 50% la fracción arena, lo cual demuestra su carácter fluvial (Fig. 63). Aunque, en el horizonte 2A se detecta un incremento en la fracción arcillosa.



*Fig. 63 Granulometría del perfil Bonfil*

Por otro lado, la textura de la Operación Arqueológica 7A muestra una dominancia de la fracción arcilla en la mayoría de sus capas (Fig. 64). Sin embargo, a profundidad predomina la fracción gruesa (arena) y, las capas 3 y 4 muestran un aumento en la fracción más fina (arcilla).



*Fig. 64 Granulometría Operación 7A*

## 5.5 Pruebas de fertilidad

Las pruebas de fertilidad se realizaron en el laboratorio Labs & Technological Services AGQ, S.L. Se analizaron principalmente horizontes orgánicos, los cuales constituyeron la superficie en la que han tenido lugar las actividades antrópicas antiguas y algunos recientes, con el objetivo de hacer una comparación entre la cubierta edáfica moderna y la pre-hispánica.

En el perfil María, se analizaron los horizontes Ah<sub>1</sub>, Ah<sub>2</sub> y el suelo relacionado a la ocupación humana (B). Como se observa en la Tabla 3, el porcentaje de carbono orgánico (CO) es alto en los horizontes Ah<sub>1</sub> y Ah<sub>2</sub>, los cuales también muestran una alta Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.) y un alto contenido de bases. En el horizonte B, el porcentaje de CO es bajo. Sin embargo, la relación C/N es similar en todos los horizontes, siendo cercana a 10, lo que indicaría una buena disponibilidad de N en el suelo. No obstante, lo anterior, se aprecia que este horizonte cultural B, tiene valores bajos en la C.I.C. y en la suma de bases (Tabla 3).

Por su parte, en el perfil Bonfil, se observan valores bajos en todos los parámetros de fertilidad analizados, lo que indica que una baja calidad agrícola. Mientras que, la muestra de suelo removido, tomada en el sitio arqueológico Budsilhá, posee los valores más altos de todas las pruebas realizadas, de manera que puede considerarse el suelo más fértil de la región, el cual constituye la cubierta edáfica actual.

**Tabla 3.** *Propiedades selectas analizadas para evaluar la fertilidad de los suelos*

Perfil	Horizonte	Carbono orgánico total (%)	N total (%)	C/N	C.I.C (meq/100g)	Suma de bases (meq/100g)
María	Ah1	5.92	0.62	9.54	81.7	41.4
	Ah2	4.12	0.38	10.84	71.0	36.95
	B	1.26	0.13	9.69	26.8	22.31
Bonfil	Ah	1.71	0.25	6.84	13.9	11.77
	2A	0.44	0.05	8.8	10.9	11.37
Budsilhá*	Suelo removido	14.0	1.11	12.61	62.8	34.53

\*dentro de la zona arqueológica. Nota: 1meq/100g = 1cmol/kg

## 5.6 Mineralogía de la fracción arcilla

Se realizó la mineralogía de arcilla de 6 muestras en total, pertenecientes a horizontes de distintos perfiles, como muestra la Tabla 4. Los tratamientos realizados a las distintas muestras fueron: sin tratamiento (orientada, rojo); muestra glicolada (verde) y muestra calentada (azul, 550°C), estos tratamientos se realizaron para poder distinguir las especies minerales en la fracción arcilla, las cuales muestran sus distintos picos en los difractogramas en la tabla 5. A continuación se muestran las fases identificadas.

**Tabla 4.** Mineralogía de arcilla de horizontes minerales

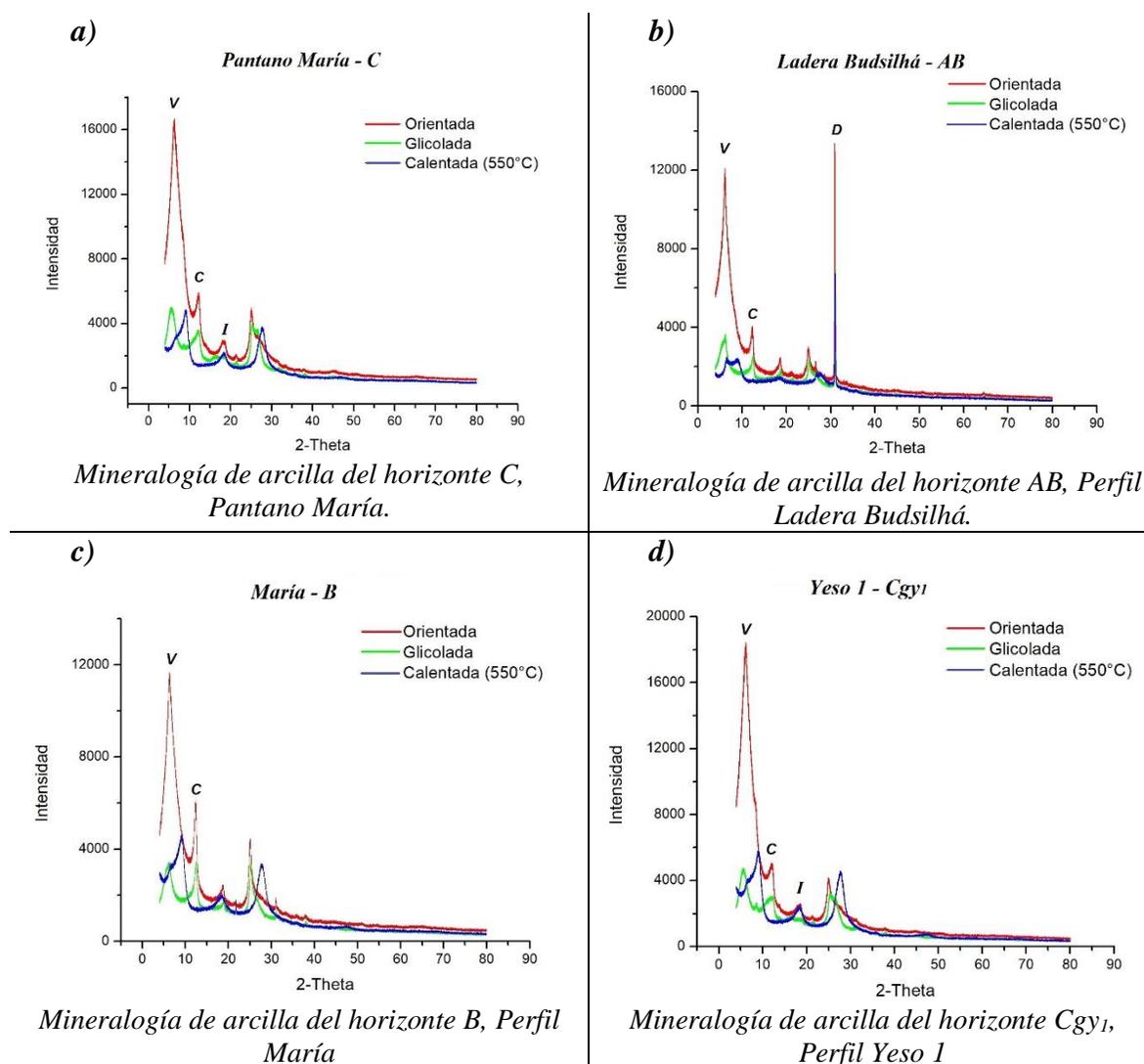
<b>Perfil</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Fases identificadas*</b>
Pantano María	C	Componente esmectítico (Vermiculita dioctaédrica, Trazas de Mica-Iilita, Caolinita±Vermiculita.
Ladera Budsilhá María	AB B	Componente esmectítico (Vermiculita dioctaédrica), Caolinita±Vermiculita y Dolomita.
Yeso 1	Cgy <sub>1</sub>	Componente esmectítico (Vermiculita dioctaédrica, Mica-Iilita, Caolinita±Vermiculita.
Pantano Budsilhá	Cg	Componente esmectítico (Vermiculita dioctaédrica, Mica-Iilita, Caolinita±Vermiculita.
Perfil 2	BC <sub>1</sub>	Componente esmectítico (Vermiculita dioctaédrica), Caolinita±Vermiculita.

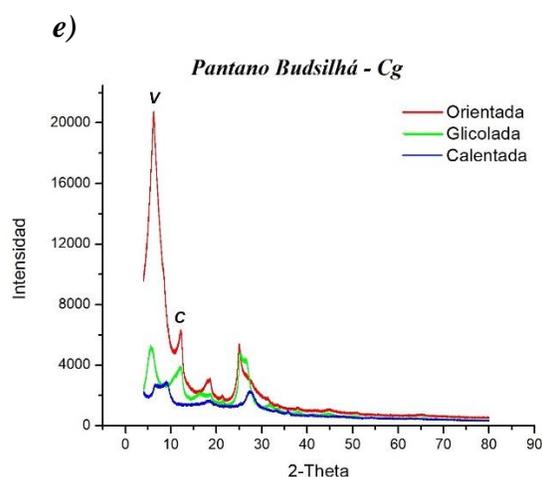
Como podemos observar, en general, las fases mineralógicas identificadas son muy similares en las distintas muestras, con presencia en todas de componentes esmectíticos como la vermiculita-dioctaédrica, la cual se pudo distinguir gracias que las vermiculitas hidratadas, producen un pico a los 14-angstrom (001) que no tiene gran expansión con el tratamiento de etilenglicol. Adicionalmente, el pico 001 de vermiculita dioctaédrica se colapsa aproximadamente a 10 angstroms después de ser calentada a 550°C (Poope *et al.*, 2001), como se muestra en la tabla 5, a. En cuanto a la identificación del grupo de las illitas, estas se caracterizan por tener picos intensos 10-angstrom (001), los cuales permanecen inalterados por el tratamiento con etilenglicol, y calentamiento a 550 °C (Fanning y otros, 1989, en Poppe *et al.*, 2001) y finalmente, la identificación de la fase mineral de las caolinitas, fue posible debido a que los miembros dioctaédricos de este grupo, se vuelven amorfos después de

calentarlos a 550°C, como se observa en todos los difractogramas de la tabla 5, por lo que sus patrones de difracción desaparecen.

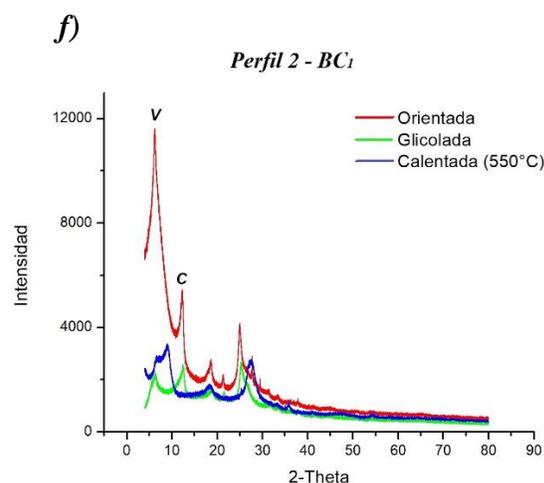
Sin embargo, es posible encontrar ligeras diferencias, como la ausencia de mica-ilita en las muestras de los horizontes B, AB y BC<sub>1</sub>, a comparación de las restantes. Además, de que la muestra B, perteneciente al perfil Ladera Budsilhá, presenta un importante componente de Dolomita, como se observa en la tabla 5, b. Otra diferencia encontrada fue en la muestra Yeso 1, la cual tiene un componente esmectítico muy importante ya que la expansión de las arcillas es más clara que en el resto de las muestras, como se muestra en la tabla 5, e.

**Tabla 5. Difractogramas de la mineralogía de arcilla**





Mineralogía de arcilla del horizonte C,  
Pantano Budsilhá



Mineralogía de arcilla del horizonte BC1,  
Perfil 2 Cantera

\*Nota: Vermiculita dioctaédrica= V, Caolinita= C, Mica-Illita=I, Dolomita=D

## 5.7 Iones mayoritarios

Este análisis se realizó en muestras de las aguas recolectadas de Pantano María, Pantano Budsilhá y Yeso 2. Los resultados se muestran en la Tabla 6 y 7.

**Tabla 6. Resultados del análisis por cromatografía iónica**

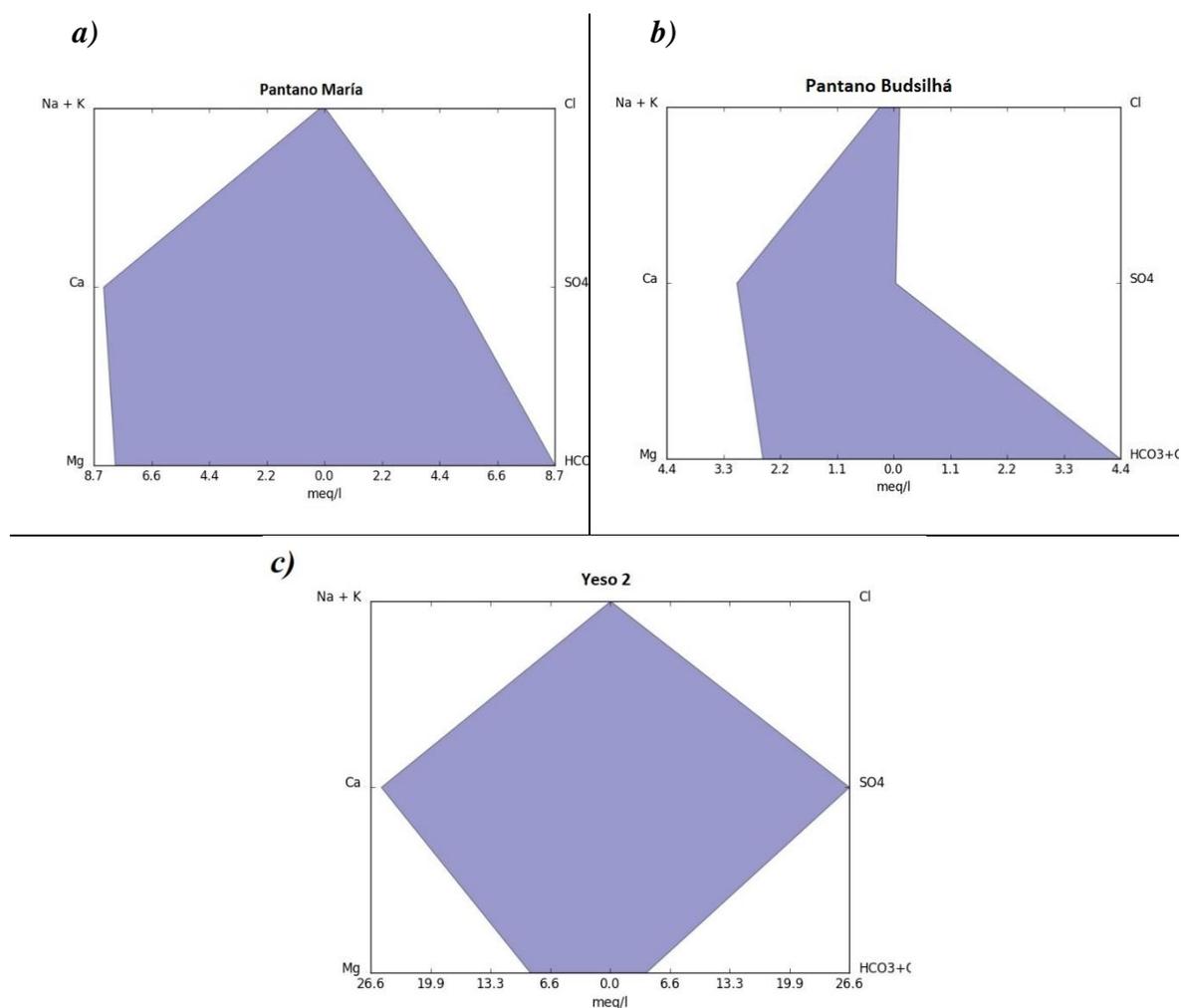
LD (mg/L)	0.18	0.29	0.29	0.34	0.91	4.00	0.06	0.14	0.14	0.21	0.11
Analito	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Clave	[mg/L]										
<b>Yeso 2</b>	8.40	3.17	6.50	<LD	1276.07	242	<LD	<LD	<LD	106.22	508.62
<b>Pantano María</b>	<LD	1.20	1.21	<LD	237.82	267	2.09	4.49	3.91	95.23	167.62
<b>Pantano Budsilhá</b>	0.22	4.03	1.17	2.14	1.79	533	3.72	1.96	4.64	30.35	60.61

**Tabla 7. Balance de cargas**

Analito	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Suma cationes	Suma aniones
Clave	[meq/L]												
<b>Yeso 2</b>	0.44	0.00	0.11	0.00	26.57	3.97	0.00	0.00	0.00	8.74	25.38	34.1	31.1
<b>Pantano María</b>	0.00	0.03	0.02	0.00	4.95	8.73	0.09	0.25	0.10	7.83	8.36	16.6	13.7
<b>Pantano Budsilhá</b>	0.01	0.12	0.02	0.07	0.04	4.38	0.16	0.11	0.12	2.50	3.02	5.9	4.6

Posteriormente, los resultados obtenidos se analizaron con el software *HatariChem* (Fig. 65) observándose que en el Pantano María hay un enriquecimiento en bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ), principalmente, así como de Ca y Mg. De igual manera, la muestra del Pantano Budsilhá, muestra un enriquecimiento en bicarbonatos, pero un decremento en Mg y Ca.

El mayor contraste, recae en el agua freática del Perfil Yeso 2, el cual mostró un alto enriquecimiento en sulfatos y calcio, principalmente, con un empobrecimiento de bicarbonatos.



**Fig. 65 Iones mayoritarios en muestras de agua:** Agua Perfil María, **a)** Enriquecimiento en  $\text{HCO}_3 + \text{Ca}^{2+}$ ; Agua Perfil Pantano Budsilhá, **b)** Enriquecimiento en  $\text{HCO}_3$ ; Agua freática Perfil Yeso 2, **c)** Enriquecimiento en  $\text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+}$ .

## **Capítulo 6**

### **Discusión y análisis de los resultados**

#### **6.1 Génesis de los suelos de la región**

Los suelos estudiados en esta investigación mostraron ligeras diferencias dependiendo los factores formadores de suelo en la zona. Cabe señalar que el suelo es un sistema en donde dichos factores (clima, material parental, relieve, biota y tiempo) interactúan entre sí para su formación (Jenny, 1941). Por lo tanto, habrá factores que parecerán más importantes. Sin embargo, el conjunto de todas las interacciones es necesaria para la evolución de un suelo.

De esta manera, uno de los principales factores que ha permitido la diferenciación tipogenética en los suelos del Valle Budsilhá, es la posición en el relieve en la que se encuentran los distintos perfiles. Por un lado, podemos encontrar suelos de humedal como Gleysoles, en las planicies o depresiones kársticas cerradas, donde se acumula el agua. Por otro lado, encontramos Leptosoles, Cambisoles y Luvisoles en las laderas o lomas, donde la pendiente no ha permitido acumulación de agua, pero ha provocado una erosión diferencial, en los materiales. Adicionalmente, en las terrazas aluviales, como lo es el perfil Bonfil y Sak-1, encontramos Fluvisoles, debido al constante aporte de sedimentos de los ríos que desembocan en el río Usumacinta. En estos casos, el factor relieve interactúa con el material parental.

El siguiente factor más influyente es el clima subhúmedo de la región, con lluvias todo el año. Lo cual ha propiciado un fuerte intemperismo químico, disolviendo las rocas calizas a lo largo de los años, dando paso a un paisaje kárstico de montaña, así como suelos asociados a dicho paisaje.

Los perfiles estudiados fueron agrupados, de acuerdo a su posición en microcuencas. De esta manera, se puede visualizar con mayor claridad los patrones pedogenéticos por grupos de perfiles.

### **Grupo A) Rancho María**

En primer lugar, tenemos los perfiles localizados en el Rancho María, estos son, Perfil María y Pantano María, los cuales son muy distintos entre sí, a pesar de encontrarse a unos cuantos metros uno del otro. Su diferencia radica en la posición geomorfológica: el perfil María se encuentra en una bolsa kárstica, en la loma de una pequeña colina, lo que ha propiciado que esta bolsa se rellene con rocas y suelo de posiciones superiores (coluvión). En tanto que, el perfil Pantano María, se encuentra en la planicie inmediata al perfil María, en una posición más baja, en una pequeña dolina. Además del relieve, hay variaciones en el material parental, ya que, en la dolina, se tienen los productos de la erosión de las rocas y los suelos circundantes. Es por ello que, en el Pantano, los suelos son más arcillosos, con ~50% (Fig. 58), de la fracción arcilla, aunque aún presenta algunos fragmentos de caliza, en los horizontes C. De igual manera, al encontrar micro-fragmentos de suelo rojo en el horizonte AB (Fig. 37, e), se evidencia que parte del material parental proviene de la erosión de los suelos en posiciones geomorfológicas superiores, que se depositaron en posiciones inferiores.

Por otro lado, en este tipo de suelos de pantano, la influencia del manto freático es importante, debido a que propicia el desarrollo de condiciones oxido-reductoras, dando una coloración pardo-grisácea, quitando cualquier evidencia de un color rojizo proveniente de los suelos superiores.

Además de los factores señalados, en el perfil María, se registra la influencia antrópica, ya que en el horizonte B, se encuentra una importante concentración de huesos, carbón, conchas (Fig. 17).

### **Grupo B) Budsilhá**

El siguiente grupo de suelos pertenece al Valle Budsilhá, que también consta de una pequeña colina de caliza y una planicie, en donde se ubica un sistema de dolinas (Fig. 16). La diferencia entre este grupo es marcada. Se considera que, el factor diferenciador es el relieve, ya que éste imprime las particularidades encontradas en los suelos. Por ejemplo, el Perfil Ladera Budsilhá, se encuentra en una ladera poco pronunciada (~5°). Las evidencias encontradas indican que el material parental es la caliza, pero también sedimentos coluviales que bajan por la pendiente. Las observaciones micromorfológicas muestran fragmentos

rojizos de suelos en una matriz carbonatada (Fig. 39, a), e inclusive restos de carbonatos primarios, lo que indica que su material parental está formado por los productos de erosión de las rocas circundantes (Figs. 39, d). Adicionalmente, esta colina tiene en su parte alta los vestigios de un edificio Maya. De esta manera, para su construcción se modifica el paisaje, provocando erosión de los suelos originales. Se considera que el fragmento de suelo rojo es indicador de una cubierta edáfica antigua que ya no se presenta en el área (Fig 39, a).

Además de los rasgos mencionados, en este perfil se encontraron fragmentos de cerámica y carbón, que son indicadores de la influencia del ser humano en la génesis del suelo (Fig. 39, c).

Por otro lado, en la planicie, los tres perfiles estudiados muestran diferencias, no solo con el de la ladera, sino entre ellos. Pantano Budsilhá, localizado en la base de la colina no contiene neoformaciones de yeso. Micromorfológicamente, exhibe una estructura similar al perfil Ladera (Fig. 39). Inclusive, se podría decir que los fragmentos de suelo encontrados en la Ladera son parecidos. Debido a que, en el Pantano, la estructura se ve in situ, se presume que este suelo podría ser parte de la cubierta edáfica previa. Sin embargo, en este perfil imperan los rasgos gleycos (Fig. 40, c y d), debido a su posición baja.

En cuanto a los perfiles Yeso 1 y Yeso 2, es notable la diferencia con el Perfil Pantano, sobre todo por su contenido de yeso (lo cual se discutirá más adelante). Sin embargo, gracias a la difracción de rayos X, se pudo observar que la mineralogía de la fracción arcilla en los perfiles Yeso 1 y Pantano Budsilhá es idéntica (Tabla 5, d y e), lo que denota un material parental similar. Adicionalmente, esta mineralogía se repite en todas las muestras estudiadas de los distintos perfiles, lo cual habla de manera general, acerca del origen local del material parental en los suelos, ya que es posible encontrar prácticamente las mismas fases mineralógicas en todos los horizontes, con ligeras variaciones.

Otro rasgo detectado se refiere a la presencia de propiedades vérticas en Yeso 2, como estructura angular y slickensides.

### **Grupo C) Cantera Nueva Esperanza**

En esta cantera, localizada al oeste del Valle Budsilhá, a pesar de tener una longitud de <100 m, muestra una variación importante en los suelos pertenecientes a este grupo. Por un lado, se encuentran los Rellenos, los cuales se encuentran en fracturas o zonas de debilidad de las calizas, las cuales están poco intemperizadas. Dichos rellenos muestran coloraciones rojizas, textura arcillosa, películas arcillosas sobre los agregados y moteados, evidenciando condiciones reductomórficas, durante ciertos periodos de su formación. Estos rasgos son claramente visibles en las láminas delgadas (Fig. 44, a y d).

Por otro lado, se encuentran los Perfiles 1 y 2, a ~15 metros, de los Rellenos 1 y 2. El perfil 1, muestra la evolución de una roca caliza saprolitizada, por lo que su horizonte C, aún conserva características de una roca caliza, como lo es su birrefringencia y la presencia de una matriz biogénica (Fig. 43, d). El perfil 2 es poco desarrollado, con un alto contenido de rocas, pero muestra una génesis distinta al perfil 1, a pesar de encontrarse a pocos metros de distancia. Estas diferencias detectadas entre los Rellenos y Perfiles 1 y 2, se atribuyen al tipo de material parental, con cambios de facies en las rocas que propician variaciones en el tipo y grado de intemperismo.

Finalmente, el perfil 3, que se encuentra en una posición más elevada, sobre la cantera Nueva Esperanza, muestra el desarrollo de un suelo totalmente diferente al perfil 1 y 2, pero similar a las características de los Rellenos 1 y 2. Este suelo, clasificado como un *Leptic Luvisol*, muestra una génesis distinta a todos los suelos estudiados, debido a la presencia de horizontes Bt, de iluviación de arcilla, lo cual muestra un mayor desarrollo edáfico.

### **Grupo D) Perfiles fuera del Valle Budsilhá**

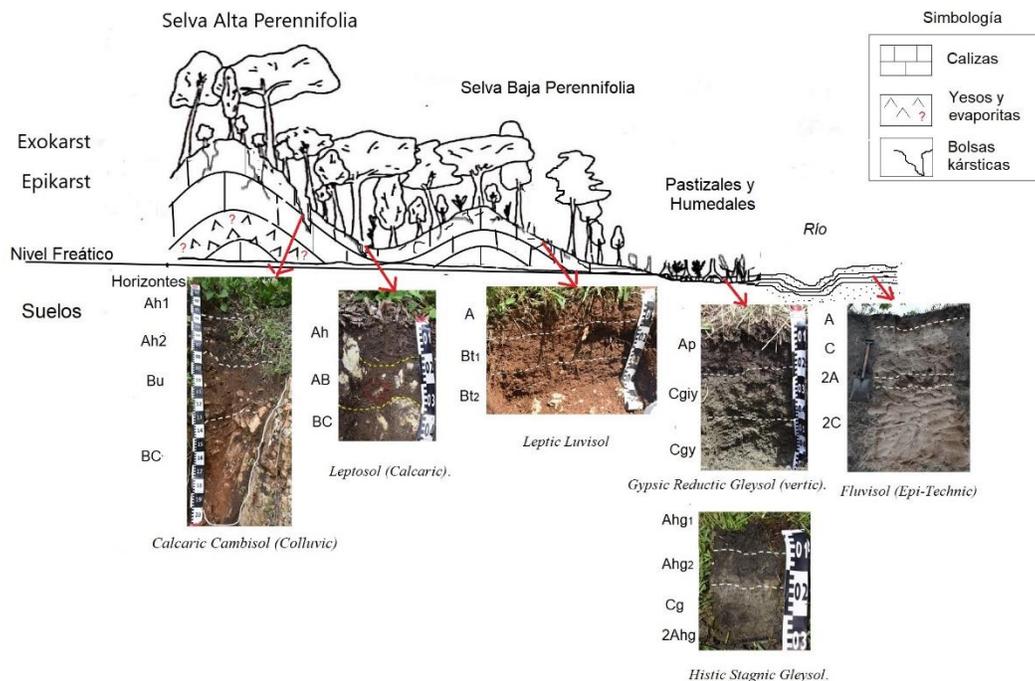
En este grupo se encuentran los perfiles Bonfil, Sak 1 y 2 y, parcialmente, Operación 7A, los cuales han sido formados a partir del constante aporte sedimentario de los ríos circundantes, este tipo de suelos han sido de gran utilidad para conocer la proveniencia de los materiales o como registro ambiental, los cuales han sido estudiados por diversos autores, pero en las Tierras bajas Mayas, han sido estudiados por (Solís *et al.*, 2013; Solís *et al.*, 2014).

Debido a que estos suelos son Fluvisoles, el perfil Bonfil muestra un aporte sedimentario de fuentes más lejanas, esto se confirma con las observaciones micromorfológicas, por la presencia de un gran contenido de cuarzo, (Fig. 45), el cual no encontramos en rocas de la zona. En contraste, Sak 1 y 2 contiene de fragmentos de travertino, los cuales se observan en toda la margen del río, por lo que se detecta un aporte local. Esta variación en el material parental promueve una pedogénesis diferente.

En cuanto al perfil Operación 7A, las actividades antrópicas han modificado fuertemente las tendencias evolutivas debido a la presencia del piso Maya en la superficie, por lo que, en este caso, el principal factor formador es el ser humano. Sin embargo, cabe señalar que en el Perfil Bonfil también se encuentran fragmentos de cerámica, hueso y carbón, lo cual se discutirá en la siguiente sección.

Finalmente, se puede decir que la cubierta edáfica detectada en la zona estudiada presenta ciertas similitudes, con los suelos encontrados por Aliphath (1994), quien estudió las tierras bajas Mayas, encontrando principalmente Leptosoles, Litosoles y Luvisoles, en un área topográficamente desigual, como colinas y laderas con pendientes marcadas. Mientras que a lo largo de las orillas del río Usumacinta, los suelos consisten en suelos aluviales profundos y, en áreas niveladas o planicies de pobre drenaje, predominan principalmente Gleysoles húmicos y Luvisoles Gleycos. Adicionalmente, de acuerdo a la literatura citada White (1988), menciona que los suelos de las zonas kársticas son formados principalmente por suelos residuales, así como la fracción insoluble de la roca carbonatada, lo cual se comprobó gracias a los diversos fragmentos subredondeados y rojos encontrados en el Perfil María, Perfil Ladera Budsilhá, así como en los Rellenos de la Cantera Nueva Esperanza (Fig. 44, a).

El siguiente diagrama muestra algunos de los distintos suelos encontrados en la zona o pedodiversidad (Fig. 66).



**Fig. 66** Pedodiversidad en el Valle Budsilhá.

## 6.2 Evolución de los suelos en el Valle Budsilhá

Los siguientes esquemas (Figs. 67-70) idealizan la evolución de los suelos en el Valle Budsilhá, durante cuatro etapas principales.

La **Etapa 1** muestra el desarrollo natural de los suelos en un paisaje kárstico tropical de montaña, donde los suelos se desarrollan de acuerdo a su posición en el relieve. De manera que, en las laderas estables es posible encontrar Luvisoles (rojos), los cuales forman una cubierta discontinua pero estable. Mientras que en las laderas más pronunciadas la cubierta edáfica es poco profunda compuesta por Leptosoles, como se discutió anteriormente.

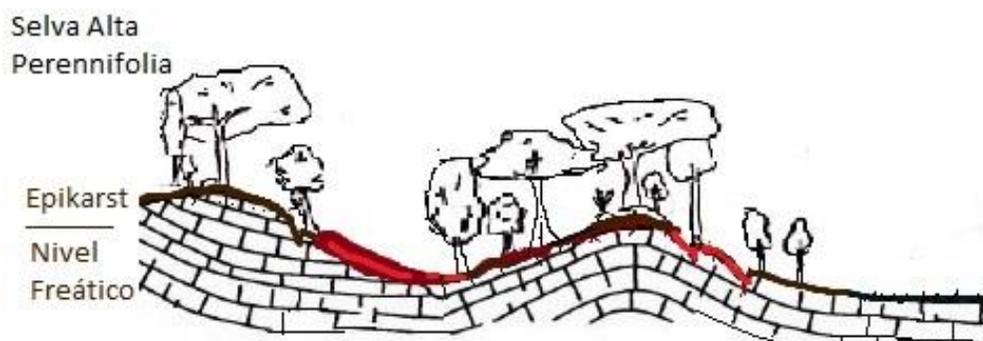
Posteriormente, la **Etapa 2** muestra como el Valle Budsilhá es ocupado y modificado, principalmente, durante el periodo Clásico Maya, donde la ocupación pre-hispánica utiliza los recursos como rocas, para la construcción de monumentos arquitectónicos y algunos complejos habitacionales, observados en la zona. Mientras que el recurso suelo, como los Luvisoles, son utilizados como materia prima para la realización de cerámica. Esto provoca una deforestación parcial de la zona, propiciando que los suelos que conforman la cubierta

edáfica durante ese periodo, se reduzcan a fragmentos encontrados en las depresiones kársticas, y en pequeños manchones de la superficie.

Durante la **Etapa 3**, el Valle Budsilhá es abandonado parcialmente, por lo tanto, el desarrollo natural de zona sigue su curso, con la revegetación nativa y el desarrollo de los suelos en las distintas posiciones del relieve, como en las planicies, las cuales siguen acumulando agua y sedimentos, tanto de las zonas superiores como de los ríos que circundan la zona. De igual manera las estructuras arquitectónicas son afectadas por la vegetación y el intemperismo.

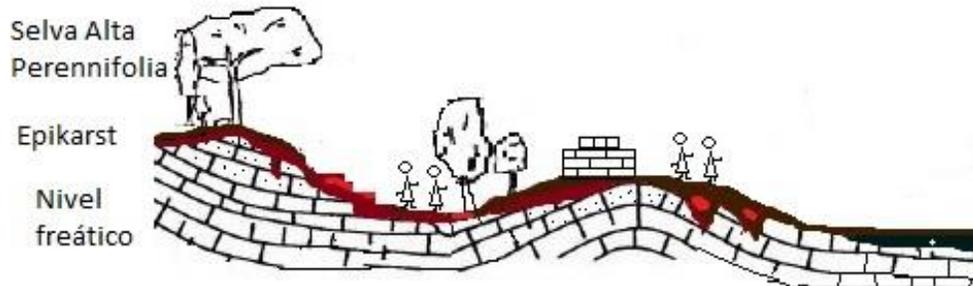
Finalmente, la **Etapa 4** nos muestra el desarrollo actual en la zona, con parches de la vegetación nativa en las zonas más alejadas de la población, así como una deforestación y cambio de uso de suelo, por suelos de pastoreo en las planicies, donde se acumula el agua en ciertas épocas del año. Así como, una explotación de las canteras de roca caliza y suelos, como materia prima para la construcción y desarrollo en las poblaciones cercanas al Valle Budsilhá. Dejando evidencia de los suelos antiguos y su ocupación pre-hispánica, en rellenos de bolsas kársticas o en las terrazas aluviales, así como un mayor deterioro de algunas estructuras arquitectónicas, de las cuales solo quedan algunos edificios o rasgos de estos.

### Etapa 1: Ambiente Natural



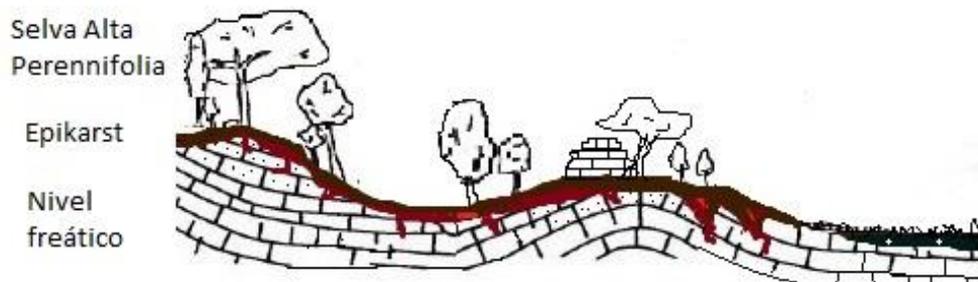
*Fig. 67 Etapa 1 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá.*

## Etapa 2: Ocupación Pre-hispánica



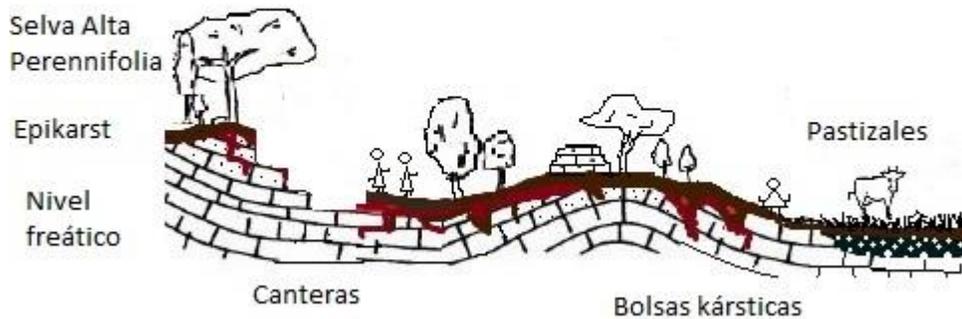
**Fig. 68** Etapa 2 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá, Ocupación Pre-hispánica

## Etapa 3: Abandono y revegetación



**Fig. 69** Etapa 3 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá, abandono y revegetación.

## Etapa 4: Desarrollo Actual



**Fig. 70** Etapa 4 de formación de suelos, en el Valle Budsilhá, desarrollo actual.

### 6.3 Efectos antrópicos en los suelos

De las principales diferencias encontradas en los suelos con influencia antrópica, resalta la abundancia de materiales antrópicos en relación con la estructura del suelo. Por ejemplo, el perfil Operación 7A, es un sitio el cual guarda varios rasgos de carácter antrópico, debido a su uso durante el periodo Clásico Maya. De esta manera, gracias a los resultados micromorfológicos, observamos una modificación en la cantidad de agregados antrópicos en el Piso 2, asociado a la cultura Maya (Fig. 47, d) en comparación con la estructura natural del horizonte A, la cual en general es granular, mientras que el horizonte Ap, tiene una estructura en bloques subangulares muy compactos, debido al constante manejo antrópico.

El perfil Bonfil muestra que las secuencias sedimentarias en las terrazas aluviales guardan un valioso registro antrópico, debido al constante aporte de sedimentos que sepulta al suelo y lo aísla de posteriores modificaciones. Este es el caso del horizonte 2A de este perfil, el cual contiene materiales antrópicos como, cerámica y fragmentos de conchas y que brinda información sobre las condiciones de formación.

Otro tipo de suelos que guardan un abundante registro antrópico, son los rellenos de las bolsas kársticas. Estos suelos han sido estudiados por distintos autores, entre otros, tanto en la zona maya de Yucatán por Cabadas *et al.* 2010 y Vargas 2018, como en la zona de Chinikijá (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2015; Wiesbeck 2012). Estas bolsas kársticas, desarrolladas como parte del *epikarst*, por procesos de disolución de las calizas, se convierten en receptáculos para los suelos, que proceden de la superficie. De esta manera, a pesar de ser delgados y discontinuos, guardan información valiosa sobre la historia del paisaje, así como una estrecha relación con las ocupaciones humanas. Por ejemplo, Emery (2003), menciona que encontrar los vestigios de ciertos tipos de huesos animales o conchas, puede reflejar el nivel económico que tenía la sociedad Maya que habitó cada zona en particular, debido al acceso a determinados recursos, como peces o mamíferos.

Un ejemplo de este tipo de suelos, es el perfil María, el cual muestra una fuerte influencia antrópica, lo que ha provocado una evolución ligeramente distinta de los suelos naturales en el área, modificando principalmente características como su granulometría, mostrando mayor porcentaje de la fracción arcilla en el horizonte B (Fig. 57), donde localizamos abundantes materiales antrópicos, como huesos y fragmentos de carbón.

Adicionalmente, gracias a los análisis de fertilidad de suelos (Tabla 4), se pudo comparar los suelos actuales y con actividades antrópicas antiguas, con mejores propiedades asociadas a la fertilidad en suelos. Por un lado, los suelos asociados a la cubierta edáfica actual, son los que han presentado mejores propiedades, estos son en específico el suelo removido de los vestigios del edificio en el Valle Budsilhá y el suelo o coluvión que cubre los dos horizontes del Perfil María. Sin embargo, los suelos asociados a actividades antrópicas antiguas, presentaron bajos valores en los parámetros de fertilidad, pero a pesar de ser suelos sepultados como el horizonte 2A del perfil Bonfil, aún muestran valores similares al suelo actual (Horizonte Ah). Las diferencias significativas, se presentan principalmente en el porcentaje de Carbono Orgánico Total y el porcentaje de Nitrógeno total, los cuales están asociados principalmente a la interacción con la vegetación, de los cuales los horizontes sepultados carecen.

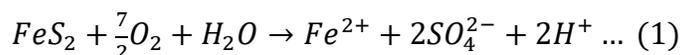
#### **6.4 Génesis de los suelos con presencia de yeso: impacto antrópico o influencia local de las aguas freáticas.**

Los suelos con yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) de origen pedogénico, generalmente, se encuentran en regiones con climas áridos o semiáridos (Nettleton *et al.* 1982, en FAO, 1990). Están bien representados en áreas secas donde existen fuentes de sulfato de calcio y por lo general, no ocurren en climas húmedos, debido a que se lixivian fácilmente. Mientras que, bajo condiciones climáticas muy cálidas, pueden transformarse en minerales como la basanita  $Ca(SO_4)0.5H_2O$  o anhidrita ( $Ca(SO_4)$ ).

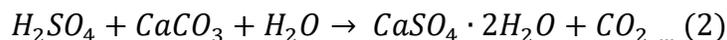
La formación de yeso ha sido descrita por varios autores (Moret, 1979; Kovda, 1954, en FAO 1990) afirma que la acumulación de yeso puede producirse de dos formas: por la evaporación del agua subterránea mineralizada y por la precipitación dentro de la misma agua subterránea.

De esta manera, debido a su composición química, el yeso tiene una solubilidad moderada de 2.53 g/L, en agua pura a una temperatura de 20°C, lo que es entre 10 y 30 veces mayor que la solubilidad de carbonato cálcico ( $CaCO_3$ ), en presencia del dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Sin embargo, la solubilidad no es constante, pero depende de varios factores, como, por ejemplo: la temperatura del agua y la presencia de otras sales. (Klimchouck, 1996).

Por un lado, la formación de yeso inicia cuando las concentraciones en los suelos, de los iones  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  son muy altas. Estos iones, puede provenir de la disolución de sulfatos de calcio contenidos en las rocas circundantes, pero pueden ser también derivados de la alteración de calizas, carbonatos de origen biológico o formaciones que contienen sulfuro, o por un proceso más complicado, en el cual el origen de los iones sulfato en la solución del suelo se debe, en algunas circunstancias, a la presencia de minerales ricos en azufre como la pirita ( $FeS_2$ ) en el material parental. Mediante el intemperismo y la oxidación, el azufre de este mineral, se transforma en ácido sulfúrico, como se muestra en la siguiente reacción (1):



Estos productos como el ion sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), puede interaccionar con el agua presente en el medio formando ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que, en suelos calcáreos o con presencia de carbonatos ( $CaCO_3$ ), reacciona para formar yeso como muestra la reacción (2) (Poch *et al.*, 2018; FAO 1990; Rivera, 2020).



Por otro lado, el proceso de disolución de yeso en agua, es un proceso rápido y común que se lleva a cabo a partir de la siguiente reacción:  $CaSO_4 \cdot 2(H_2O) \leftrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$ . De esta manera, el yeso que está en contacto con el agua se disuelve instantáneamente. Por lo tanto, el agua que se encuentra inmediatamente en contacto con el yeso, estará completamente saturada (Klimchouck, 1996; White, 1988).

Algunos usos que se le ha dado al yeso, ha sido como fertilizante desde hace cientos de años. Por ejemplo, en Europa, se utilizó en el siglo XVII. Sin embargo, recientemente el yeso se ha utilizado como enmienda para recuperar suelos sódicos degradados. Su uso mejora las propiedades físicas del suelo como, la penetración del agua, mejorar la estructura del suelo, debido la penetración del aire, por el crecimiento de las raíces de las plantas y el movimiento del agua (Dick y Chen, 2011; Barčauskaitė *et al.*, 2020)

Por lo tanto, gracias a la información recopilada anteriormente y los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, fue posible generar una posible vía para la formación de yeso en suelos de hidromórfos, en un clima tropical, con lluvias todo el año, como se describe a continuación.

Gracias a las observaciones micromorfológicas, se observó que el crecimiento de los cristales de yeso se encuentra principalmente en los horizontes minerales, es decir a partir del horizonte B, con un aumento en abundancia y tamaño en los horizontes C. Esto se debe a que, en dichos horizontes la materia orgánica es prácticamente nula y de acuerdo a Cody y Cody (1988), la materia orgánica restringe la formación de cristales de yeso, debido al alto peso molecular de los compuestos orgánicos. Sin embargo, no se descarta por completo encontrar cristales de yeso, pero sus morfologías son principalmente lenticulares. Es por ello que, en los horizontes A del perfil Yeso 1 y 2, la presencia de cristales de yeso es prácticamente nula. Pero, el desarrollo de los cristales más grandes se encuentra en los horizontes C<sub>gy</sub> y C<sub>gy</sub>, como lo muestra las figuras 41 y 42.

De esta manera, se puede observar que la formación de estos cristales se da principalmente en los canales o poros, lo cual nos habla de que su formación es posible gracias al agua freática que circula en el suelo, la cual es rica en iones sulfato y calcio, que precipita en el suelo en forma de yeso, dando paso a las distintas morfologías y tamaños encontrados, como se observó en las distintas láminas delgadas.

Adicionalmente, se pudo observar que los cristales de yeso, no muestran rasgos de intemperismo, a pesar de ser un mineral con una alta solubilidad, como se mencionó anteriormente. Tienen un buen estado de conservación, con caras cristalinas euhedrales, a pesar de encontrarse en suelos hidromórficos. La ausencia de bahías de disolución, nos indica que estos cristales son recientes y frescos, lo cual ha provocado en ciertos casos, el intercrecimiento de cristales de yeso, como se observa en la figura 42, d. Esto nos indica que, los cristales de yeso, no pueden ser vestigio de alguna sequía antigua, sino que son producto de las condiciones actuales, presentes en el área.

Otro factor que puede haber ayudado a la conservación de los cristales de yeso, es el material parental arcilloso, que se encuentra en >50% en los horizontes de los perfiles Yeso 1 y 2 (Figs. 59 y 60), lo cual promueve una cubierta semi-impermeable. De manera que, el agua freática pasa a través de poros muy estrechos y conserva mejor los cristales de yeso, generando que se formen cada vez más sin dejar salir el agua o que penetre el aire.

Finalmente, los estudios realizados por Golden *et al.* (2019), en los suelos de humedal, donde se encontraron los suelos con formaciones de yeso, confirman que esta planicie no fue

utilizada como lugar de cultivo, puesto que no se encontraron fragmentos líticos u orgánicos. Justificando que la formación de cristales de yeso, no provienen del uso de fertilizantes durante el periodo Clásico Maya. Es por ello, que no se considera como hipótesis la adición de yeso como fertilizante, debido a que es un mineral muy soluble, por lo que la formación de yeso es un proceso actual.

De esta forma, se propone que la neoformación de yeso, está relacionada con la presencia de aguas subterráneas ricas en sulfato de calcio, dados los valores de pH y C.E. que se encontraron en estos suelos y que contrastan con la del resto de los perfiles (Figs. 51 y 52). Los análisis del agua de estos perfiles demuestran un predominio de sulfatos (Fig. 65). La literatura muestra que, en efecto, en ciertas porciones del noreste de Chiapas, se encuentran rocas evaporíticas, como yeso (Viniestra, 1981 en Moran *et al.*, 1984), las cuales podrían ser responsable del contenido de sulfatos en las aguas subterráneas.

## **Capítulo 7 Conclusiones**

Los suelos durante este proyecto de investigación mostraron una variabilidad en los patrones de formación, dependiendo de las condiciones geomorfológicas, principalmente. La posición en el relieve juega un papel muy importante en los suelos. Ya que, el material parental está condicionado por el relieve, debido a la alta dinámica geomorfológica en la zona, favorecida por los procesos kársticos, que remueven la cubierta edáfica superficial, sobre todo cuando la vegetación es alterada, ya sea por procesos naturales o antrópicos, como la deforestación. De esta manera, en los sitios de pendiente pronunciada, es común encontrar suelos tipo Leptosol, los cuales en ciertas ocasiones son cubiertos por coluviones de posiciones superiores. Mientras que, en sitios de pendiente nivelada, donde aflora la roca caliza, se han encontrado suelos de alto grado de desarrollo, a pesar de ser poco profundos, como fue el caso del Perfil 3. Por otro lado, en las zonas de menor pendiente, se propicia la acumulación de agua, promoviendo suelos con propiedades gleyicas. Presentando en algunos casos acumulación de yeso.

Las propiedades químicas del agua subterránea, parecen estar promoviendo los procesos de precipitación de los sulfatos; lo cual puede ser producto de la interacción de las rocas

presentes en la zona y el agua freática. Sin embargo, es necesario realizar más análisis en la zona, para entender a que se deben las diferencias, de que solo encontremos yeso en los suelos hidromórficos más cercanos al río, en comparación con los que se encuentran más lejanos.

En cuanto a las modificaciones por las actividades humanas pre-hispánicas, a pesar de presentarse un gran número de construcciones asociadas a la cultura Maya, los registros más abundantes en los suelos estudiados, fueron los que se encuentran en bolsas kársticas o directamente en los sitios arqueológicos. Sin embargo, a pesar de que los suelos presentan fragmentos de cerámicas, carbón, o huesos. No mostraron modificaciones significativas por la presencia de este tipo de materiales, solo los horizontes más superficiales, como lo fue el caso del horizonte Ap, en el sitio Sak Tzil, mostró una estructura mucho más compacta que los suelos naturales, debido al constante uso humano.

Los cambios más significativos, asociados a las actividades humanas pre-hispánicas, podrían estar asociados al hallazgo micromorfológico de fragmentos rojos, subredondeados, en los horizontes de suelos asociados a las actividades antrópicas, los cuales se encuentran en posiciones geomorfológicas de mediana pendiente. Dichos fragmentos, muestran los vestigios de un suelo distinto al encontrado en la zona. Por estas razones, no se puede asegurar completamente, que estos fragmentos rojos, estén asociados a una erosión antrópica o sean producto de la erosión natural de la zona, por la alta dinámica geomorfológica.

Finalmente, es claro que la evolución de los suelos en un paisaje kárstico tropical ha sido modificada con el paso de los años, dependiendo el uso que se les ha dado. Sin embargo, actualmente los suelos y vestigios arqueológicos del Valle Budsilhá y sus alrededores, se han visto más afectados por la deforestación y el uso de las rocas y suelos, como bancos de materiales para las construcciones de las localidades cercanas. Conservando solo en las depresiones como bolsas kársticas y, en los sitios de difícil acceso, los testigos de la cultura Maya que habitó la zona.

## Bibliografía

- Aliphath M. (1994). *Classic Maya Landscape in the Upper Usumacinta River Valley*. Calgary Alberta : The University of Calgary.
- Aliphath M. y Caso L., (2013). La construcción histórica de las Tierras bajas Mayas del sur, por medio de mapas esquemáticos. *Historia Mexicana*, *LXIII*(2), 839-876. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60031075007>
- Balzotti C., Golden C., Scherer A., Terry R. (2013). Stable carbon isotope signatures of ancient Maize agriculture at El Kinel, Guatemala. *Central European Geology*, *56*, 59-74.
- Barčauskaitė K., Brazienė Z., Avizienytė D, Silva M, Drapanauskaite D., Honer K., Gvildienė K., Slinksienė R., Jancaitiene K, Mazeika R., Staugaitis G., Dambrauskas T., Baltakys K. y Baltrusaitis J. (2020). Mechanochemically synthesized gypsum and gypsum drywall waste cocrystals with urea for enhanced environmental sustainability fertilizers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103965>
- Bautista F., Palacio G., Ortiz M., Batllori E., Castillo M. (2005). El origen y el manejo maya de las geformas, suelos y aguas Yucatán. *Universidad Autónoma de Campeche, Yucatán e Instituto de Nacional de Ecología, Campeche*, 21-32.
- Bautista, F., Palacio A. G., Quintana P., Zinck J.A. (2011). Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 308-321.
- Beach T., Dunning N., Luzzadder S., Cook D. y Lohse J. (2006). Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands. *Catena*, *65*, 166-178. doi:10.1016/j.catena.2005.11.
- Beach T., Luzzadder-Beach S., Dunning N. y Cook D. (2008). Human and natural impacts on fluvial and karst depressions of the Maya Lowlands. *Geomorphology*, *101*, 308-331.
- Blair, R.W. (1986). *Karst Landforms and Lakes*. NASA, *Geomorphology from Space*.
- Brevik E., Homburg J. y Sandor J. (2018). Soils, Climate, and Ancient Civilizations. In y. Y. William R., *Climate Change Impacts on Soil Preocesses and Ecosystem Properties* (p. 220). Elsevier.
- Bullock P., Fedoroff N., Jongerius A., Stoops G. y Tursina T. (1999). *Manual para la descripción micromorfológica de suelos* . (D. M. Castorena, Trans.) Albrington, Wolverhampton, England: Waive Research, Mount Pleasant, Beamish Lane.
- Burkart B. (1983). Neogene North American-Caribbean plate boundary across Northern Central America; Offset along the Polochic Fault. *Tectonophysics*, *99*, 251-270.

- Cabadas B., Solleiro E., Sedov S., Pi T. y Gama J. (2010). Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatan: a record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability. *Geomorphology*, 122, 323-337.
- Cano G. (2017). *Manual de prácticas de la materia de Edafología*. México. Obtenido de utselva.edu.mx: [www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf](http://www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf)
- Cody R. y Cody M. (1988). Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 247-255.
- Dana J. (1997). *Dana's New Mineralogy*. New York: Wiley & Sons.
- Das R., Evan A. y Lawrence D. (2013). Contributions of long-distance dust transport to atmospheric P inputs in the Yucatan Peninsula. *Global Biogeochemical Cycles*, 1, 167-175. doi:10.1029/2012GB004420
- Dick W. y Chen L. (2011). *Gypsum as an Agricultural Amendment: general use guidelines*. Ohio: The Ohio State University.
- Emery K. (2003). The noble beast status and differential access to animals in the Maya world. *World Archaeology*, 34(3), 498-515.
- Essington M. (2015). *Soil and Water Chemistry: An integrative approach* (Second ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Estrada H., Jiménez J., Álvarez O. y Barrientos R. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria, Mutidisciplinary Scientific Journal*, 29. doi:10.15174/au.2019.2292
- Fernández F., Johnsons K., Terry R., Nelson S. y Webster D. (2005). Soil Resources of the Ancient Maya at Piedras Negras, Guatemala. *Soil Science Society of America*, 2020-2032.
- Flores L. y Alcalá R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. México, D.F.: Instituto de Geología, UNAM.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1990). Management of gypsiferous soils. *FAO Soils Bulletin* 62, 81.
- Ford D., Williams P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Fragoso P., Bautista F., Frausto O. y Pereira A. (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 127-137.
- Golden C., Scherer A., Del Pilar S., Morell S., Newman S., Solleiro E. y Solis B. (2019). *Proyecto arqueológico Busiljá-Chocoljá*. AlphaWood Foundation Chicago.

- Gutierrez M. (2012). *Geomorphology*. Austin, TX, USA: CR Press, Taylor & Francis Group.
- Holliday V.T. (2004). *Soils in Archaeological Research*. New York: Oxford University Press.
- INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Chiapas*. México: INEGI.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Roma : FAO.
- Jacob J. (1995). Archaeological pedology in the Maya Lowlands . *Soil Science Society of America* , 51-79.
- Jenny H. (1941). *Factors of Soil Formation: a system of quantitative pedology*. New York: McGraw-Hill.
- Johnson K., Terry R., Jackson M. y Golden C. (2006). Ancient soil resources of the Usumacinta River Region, Guatemala. *Journal of Archaeological Science*, 1117-1129.
- Klimchouk A. (1996). The dissolution and conversion of gypsum and anhydrite . *Journal Speleology*, 21.-36.
- Klimchouk, A. (2004). Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2 (1), 1-13.
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M.d.C., Ahrens, R.J., Cruz-Gaistardo, C.O., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E. (2013). *The Soils of Mexico* . New York, NY, USA: Springer.
- Kueny, J.A. y Day, M.J. (2002). Designation of protected karstlands in Central America: a regional assessment. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64, 165-174.
- Lampe P. (2016). *Maya Civilization*. Salem Press Encyclopedia.
- Liendo R., Solleiro E., Solis B., Sedov S. y Ortiz A. (2014). Population Dynamics and Its relation to Ancient Landscapes in the Northwestern Maya Lowlands: Evaluating Resilience and Vulnerability. *Archeological papers of the American Anthropological Association*, 24, 84-100. doi:10.1111/apaa.12031.
- Loaiza J., Stoops G., Poch R. y Casamitjana . (2015). *Manual de Micromorfología de suelos y técnicas complementarias*. Melellin, Colombia: Pascual Bravo.
- Lowe L., Kaneko A., Lalo G. y Linares E. (2010). *Las Tierras Altas de Chiapas (The Chiapas Highlands)*. Ciudad de México-Sevilla: Asociación Cultural Na Bolom A.C. Obtenido de [https://www.academia.edu/28851858/Las\\_tierras\\_altas\\_de\\_Chiapas\\_The\\_Chiapas\\_Highlands](https://www.academia.edu/28851858/Las_tierras_altas_de_Chiapas_The_Chiapas_Highlands)

- Melgarejo J., Proenza J., Galí S. y Llovet X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- Mora P., L., Bonifaz R., López-Martínez R. (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 377-394.
- Moran D., F. J. (1984). *Geología de la República Mexicana*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Peiro R. (1995). Procesos de Karstificación. 1-8.
- Peiro R. y Fernández E. . (1995). Introducción a la geología kárstica. In P. Ramón, *Procesos de Karstificación* (p. 202). Barcelona: Imprimeix, Badalona.
- Poch R., Artieda O. y Lebedeva M. (2018). Gypsic Features. In I. o. Regoliths, *Stoops G., Vera M. y Mees F.* (pp. 259-287). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-53156-8.00010-6
- Poppe L.J., Paskevich V.F., Hathaway J.C. y Blackwood D.S. (2001). A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction. *United States Geological Survey*, 89.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A.,. (2010). *Propuesta para la generación semiautomatizada de Unidades de Paisaje*. Morelia, Michoacán, México : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rivera, M.Y. (2020). *Interacción de carbonatos edáficos con soluciones ácidas generados por minería: mecanismos de neutralización e inmovilización de contaminantes*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rzedowsky J. (1983). *Vegetación de México* (2 ed.). México: Limusa .
- Secombe P. y Giroux G. (2011). *2011 Summary Report on the Ixhuatan Advanced Stage Gold Project, Chiapas State, Mexico*. Vancouver, British Columbia, Canada: CANGOLD LIMITED.
- Siart, B., Bubanzer, O., Eitel, B.,. (2009). Combining digital elevation data SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study. *Geomorphology*, 112, 106-121.
- Solís B., Ortíz M. y Solleiro E.,. (2014). Unidades geomorfológico-ambientales de las Tierras Bajas Mayas de Tabasco-Chiapas en el río Usumacinta: Un registro de los procesos aluviales y pedológicos durante el Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 279-290.

- Solís B., Thiel C., Cabadas H., Solleiro E., Sedov S., Therhorst B., Damm B., Frechen M. y Tsukamoto S. (2013). Holocen sequences in the Mayan Lowlands - A provenance study using heavy mineral distributions. *E&G Quaternary Science Journal*, 62(2), 4-17. doi:10.3285/eg.62.2.01
- Solís U. (2016). *Renacer Cultural*. Obtenido de <http://renacercultural.blogspot.com/2016/07/los-mayas.html>
- Solleiro R., E., Terhorst B., Cabadas B., H., Sedov S., Damm B., Sponholz B. y Wiesbeck C. (2015). Soils and pedosediments in carstic depressions in Yucatan. In *Influence of Mayan land use on soils and pedosediments in karstic depressions in Yucatan, Mexico* (Vol. 42, pp. 233-266). Erlanger Geographische Arbeiten.
- Stokes T., Griffiths P. y Ramsey C. (2010). Karst Geomorphology, Hydrology, and Managment. In R. T. Pike, *Compendium of Forest Hydrology and Geomorphology in British Columbia* (pp. 373-400). Province of British Columbia .
- Stoops G., Vera M. y Mees F. (2010). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-53156-8.00010-6
- White W.B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York: Oxford University Press.
- Wiesbeck C. (2012). *The influence of Mayan land use on soils and pedosediments in carstic depressions in Yucatán, Mexico*. Wurzburg: Julius-Maximilians-Universitat Wurzburg, Institut fur Geographie.
- Yaalon D.H. (1997). Soils in the Mediterranean region: what makes them different? *Catena*, 157-170.