



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Caracterización mineral de niveles
ricos en restos de plantas de la
cuenca de Guadix-Baza:
implicaciones geomorfológicas y
ambientales**

Alumna: Ángela Valiente Vázquez

Jaén, Junio 2017



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN MINERAL DE NIVELES RICOS EN RESTOS DE PLANTAS DE LA CUENCA DE GUADIX-BAZA: IMPLICACIONES GEOMORFOLÓGICAS Y AMBIENTALES

Alumna: Ángela Valiente Vázquez

Jaén, Junio 2017

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Contexto geológico.....	6
1.2. Objetivos.....	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.1. Recogida de muestras.....	8
2.2. Métodos y análisis empleados.....	10
2.2.1. Tratamientos previos.....	10
2.2.2. Difracción de Rayos X (XRD).....	12
2.2.3. Análisis elemental CHNS-O.....	13
2.2.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	13
2.2.5. Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM).....	13
3. RESULTADOS.....	14
3.1. Caracterización mineralógica de los niveles por XRD.....	14
3.2. Caracterización morfológica. SEM.....	19
3.3. Datos obtenidos con HRTEM.....	21
3.4. Análisis elemental del carbono.....	26
4. Discusión.....	26
4.1. Integración de resultados de las terrazas de Llano Gálvez.....	26
4.2. Interpretación de las asociaciones de minerales de la arcilla.....	27
4.3. Implicaciones climáticas y del área fuente.....	28
5. CONCLUSIONES.....	29
6. AGRADECIMIENTOS.....	30
7. BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXO 1.....	33
ANEXO 2.....	35

RESUMEN

Este estudio pretende determinar la influencia de los factores climáticos, tectónicos y geomorfológicos que determinan la formación de sedimentos lacustres ricos en restos fósiles, a través de diversas técnicas y métodos de caracterización y análisis mineral y geoquímico. Se han estudiado dos niveles de sedimentos de distintas edades: (1) sedimentos endorreicos de la cuenca de Guadix-Baza, que pertenecen al Pleistoceno inferior, y (2) sedimentos fluviales de una terraza perteneciente a la red de drenaje actual de la cuenca, que forma parte de la cuenca hidrográfica del río Guadiana Menor y con edad correspondida entre el Pleistoceno superior y el Holoceno. Entre otros objetivos se pretende comparar dichos niveles, aparentemente similares a visu para ver sus relaciones ambientales.

ABSTRACT

This study aims to determine the influence of climatic, tectonic and geomorphological factors that determine the formation of lake sediments rich in fossil remains, through various techniques and methods of characterization and analysis mineral and geochemical. Two sediment levels of different ages have been studied: (1) endorheic sediments of the Guadix-Baza basin, which belong to the lower Pleistocene, and (2) fluvial sediments of a terrace belonging to the current drainage network of the basin, which forms part of the watershed of the Guadiana Menor river, and with age corresponded between the upper Pleistocene and the Holocene. Among other objectives, it pretend to compare such levels, apparently similar to visu to see their environmental relationships.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de los sistemas sedimentarios continentales se encuentra fuertemente influida por las características climáticas y tectónicas que actúan en la cuenca de depósito y que determinan el desarrollo de distintos tipos de facies, las cuales reflejan ambientes de depósito particulares que dan lugar a la formación de rocas bajo condiciones específicas de sedimentación.

La existencia de niveles ricos en restos fósiles de plantas en cuencas intramontañosas es producto de eventos que pueden tener su origen en procesos tectónicos, geomorfológicos o ambientales.

Desde el punto de vista tectónico y geomorfológico, el desarrollo de grandes deslizamientos en cuencas fluviales continentales puede producir ambientes sedimentarios lacustres en los que se favorezca el depósito de materia orgánica terrestre. La existencia de este tipo de ambientes ha sido descrita ampliamente en zonas de tectónica activa reciente tales como el Himalaya ([Hewitt, 1998](#); [Weidinger, 1998](#)), los Alpes ([Wassmer et al., 2004](#)) o la Cordillera Bética ([García et al., 2011](#)).

Desde el punto de vista climático y ambiental, la alternancia de periodos húmedos y fríos con otros de carácter seco y cálido puede tener un efecto decisivo en el desarrollo de las facies sedimentarias y en su composición mineral ([Altin et al., 2015](#)).

Los ambientes lacustres son especialmente sensibles a las modificaciones climáticas por su rápida respuesta a las variaciones de balance hídrico que producen subidas y bajadas del nivel de agua en el lago ([Eugster y Hardie, 1978](#)). La evaporación produce sobresaturación de los elementos en el agua y consecuentemente precipitación mineral. Por ello, la composición mineralógica de depósitos de sistemas lacustres refleja cambios climáticos asociados a cambios de nivel del lago y cambios de la composición química de las aguas. De esta forma, la caracterización mineral de los niveles puede aportar los datos necesarios para la determinación de su origen.

Este trabajo se centra en el estudio de la secuencia sedimentaria que contiene niveles negros ricos en restos de plantas de la cuenca del Guadiana Menor, que está situada al sur de España, en la Cordillera Bética (Fig.1), al noroeste de la provincia de Granada ([Fernández, 2009](#)), y engloba la cuenca de Guadix-Baza (Fig. 2). Esta cuenca intramontañosa es una de las más grandes de dicha cordillera, con unos 4000km² de extensión.

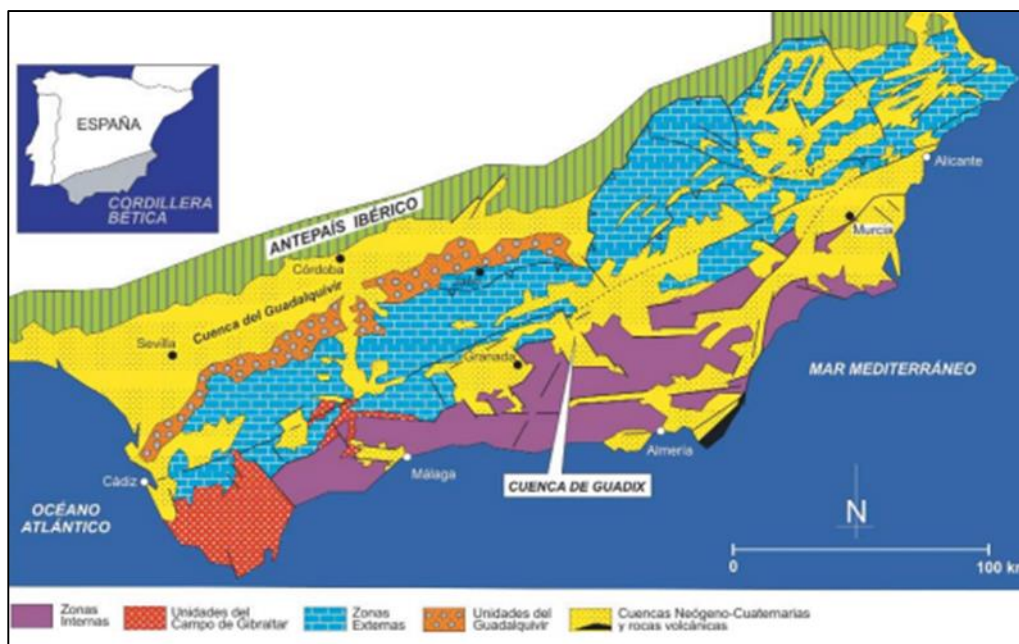


Figura 1. Esquema geológico de la Cordillera Bética. (Soria y Viseras, 2008).

Muchos autores que han profundizado en el estudio de estos sedimentos y su origen, lo han hecho con un carácter estratigráfico, sedimentológico y paleontológico (Ej. Gibert, 2006; Larrasoaña et al., 2010; Wagner et al., 2008). Estudiar la mineralogía y la composición geoquímica de estos sedimentos puede aportar datos que complementen esta información.

1.1. Contexto geológico

El área de estudio se localiza en las proximidades de la localidad de Galera (Granada). Este área se engloba dentro de lo que tradicionalmente se ha denominado como Cuenca de Guadix-Baza. Dicha cuenca cuenta con dos zonas diferentes respecto a los materiales depositados: el sector occidental, en el que predominan los sedimentos detríticos (Vera, 1970; Viseras, 1991) y el sector oriental, en el que predominan los sedimentos lacustres (Vera, 1970; Peña, 1985). Esta división se debe a la actividad tectónica.

La cuenca fue rellenada por estos sedimentos durante su etapa endorreica formando una sucesión típicamente lacustre con alternancia de niveles carbonatados, niveles margosos y niveles de limos y arcillas. Dentro de esta secuencia y, especialmente, asociados a los niveles de limos y arcillas se identifican varios

[illegible]

as la etapa endorreica la cuenca fue disectada por la red fluvial actual,

En el caso de los niveles negros endorreicos, uno muy próximo al exorreico y otro situado en el talud de la carretera nacional A330 en las proximidades de Galera, la

sucesión en la que se encuentra es típicamente lacustre, con alternancia de niveles carbonatados, niveles margosos y niveles de limos y arcillas con los que van asociados los dos niveles negros.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es determinar la influencia de los factores tectónicos, geomorfológicos y climáticos en el origen de los sedimentos que componen la terraza deposicional lacustre cuaternaria desarrollada en la cuenca del Guadiana Menor en las proximidades de Galera (Granada) y que incluye niveles ricos restos de plantas desarrollada. Los datos mineralógicos y geoquímicos de estos niveles pueden aportarnos información relevante para la determinación del origen del mismo.

Para determinar el origen de los sedimentos de estos niveles de la cuenca del Guadiana Menor se han empleado distintas técnicas que han permitido determinar su mineralogía y composición química.

Además del interés científico, este trabajo también tiene un objetivo formativo, como ser capaz de analizar e interpretar cuantitativa y cualitativamente datos aportados por las diversas técnicas utilizadas, y aplicar dichos conocimientos a la resolución de un problema.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales estudiados y toma de muestras

La zona de estudio se centra en el área de Galera, una localidad de Granada en cuyas proximidades afloran materiales de:

- a) Las terrazas exorreicas desarrolladas en el curso del río Galera. Este tipo de materiales se estudiaron en el sector de Llano Gálvez (Fig. 3), dónde se aprecian con claridad, al menos, dos niveles ricos en materia orgánica.



Figura 3. Llano Gálvez, zona correspondiente a la etapa exorreica.

Las condiciones de afloramiento permitieron el muestreo de los materiales de la secuencia que se indican en la figura 4A: LG1 (primer nivel de materia orgánica) y LG2 (segundo nivel de materia orgánica).

También se recogieron muestras pertenecientes a niveles intercalados entre estos, que están bien diferenciados (Fig. 4A).

LG3: nivel de limos laminados.

LG4A: parte basal de un nivel de travertinos rotos.

LG4B: parte basal de un nivel de travertinos rotos.

LG5: nivel de limos laminados.

LG6: nivel de limos finos y margas.

LG7: nivel de travertinos.

- b) Además, se recogieron dos muestras de niveles negros ricos en materia orgánica del basamento de la terraza de Llano Gálvez, más antiguas cronológicamente, correspondientes a la etapa endorreica: BLG1 y BLG2 (Fig. 4B).

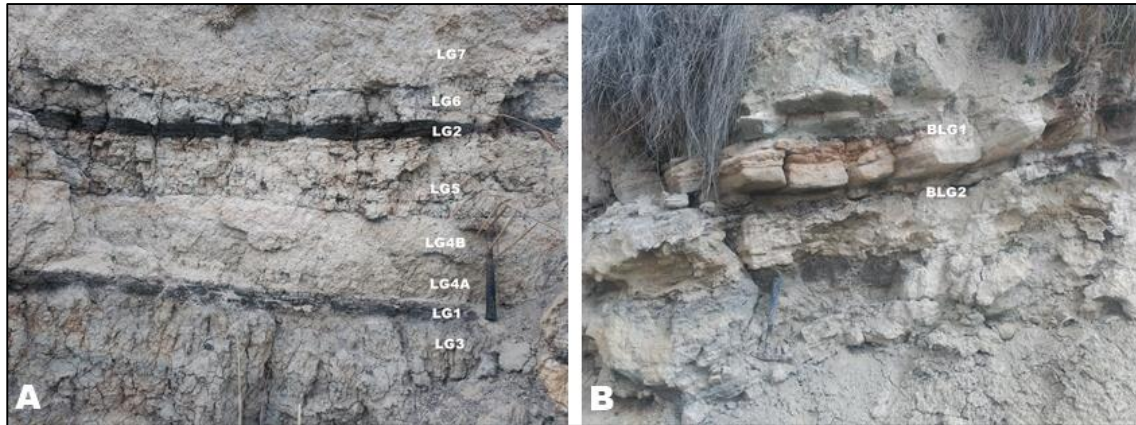


Figura 4. Muestreo en Llano Gálvez (A). Muestreo en Basamento Llano Gálvez (B).

Por último, se hizo un tercer muestreo en el talud de la carretera nacional A330 en las proximidades de Galera: CG

Todas las muestras fueron tomadas con ayuda de un martillo, llenando bolsas de plástico, con aproximadamente 0,5 kg de muestra fresca que fueron transportadas hasta el laboratorio. Al no ser un material altamente delicado, no hubo que hacerle ningún tipo de tratamiento in situ.

2.2. Métodos y análisis empleados

2.2.1. Tratamientos previos

Para la aplicación de las diversas técnicas para la caracterización y el análisis de las muestras es necesario recurrir a unos tratamientos previos.

Una vez secadas todas las muestras, fueron molidas con un mortero de hierro (Fig. 5A) hasta obtener un polvo grueso. Para conseguir una mejor preparación de la muestra, posteriormente se sometieron a una segunda molienda con un mortero de ágata (Fig. 5B), para triturar cualquier grano que el mortero de hierro no ha sido capaz de moler para así obtener preparaciones totalmente homogéneas y de grano más fino.



Figura 5. Mortero de hierro (A). Mortero de ágata (B).

De estas muestras ya trituradas se obtienen polvos desorientados (Fig. 6A), que se corresponden con la muestra en polvo tal cual, y también agregados orientados totales (AOT).

Este último método (AOT), consiste en verter en un tubo de ensayo una parte de muestra en polvo y diluirlo con agua. Para que se diluya bien, es necesario agitar durante unos 15 segundos y dejar decantar 10 segundos para que los granos más gruesos se depositen en el fondo del tubo y se queden en suspensión las arcillas, que son los minerales de interés en este estudio. A continuación, se vierte la preparación en un portamuestras de vidrio y se deja secar a temperatura ambiente durante 48 horas (Fig. 6B).



Figura 6. Muestras en polvo (A). Agregados Orientados Totales (B).

2.2.2. Difracción de rayos X (XRD)

Este método permite la caracterización mineralógica de las muestras. Se utilizó un equipo de difracción de Rayos X en polvo Empyrean de PANalytical en el Centro de Instrumentación Científico-Técnica de la Universidad de Jaén (Fig. 7).

Este equipo, mediante un programa de software, nos permite obtener difractogramas de las muestras analizadas. En este caso, obtuvimos difractogramas de los once niveles estudiados, con un total de 22 difractogramas, ya que además de las 11 muestras en polvo, se barrieron los agregados orientados totales para realizar una caracterización mineralógica más completa de los minerales de la arcilla.

Posteriormente, para confirmar la presencia de esmectitas en tres de las muestras (LG1, LG2 Y LG5), se les hizo un tratamiento con etilenglicol a los agregados



Figura 7. Equipo de difracción de Rayos X utilizado

orientados (AO+ET). Consiste en llevar los agregados orientados totales a 80°C en una estufa con una atmósfera de etilenglicol durante 48 horas.

2.2.3. *Análisis elemental CHNS-O*

El análisis elemental CHNS se llevó a cabo mediante un analizador elemental automático (modelo Flash EA1112 CHNS-O de Thermo Finnigan), Centro de Instrumentación Científico-Técnico de la Universidad de Jaén), que obtiene datos cuantitativos de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, aunque en este caso nos centraremos en los datos de carbono, ya que queremos cuantificar la presencia de materia orgánica en nuestros niveles.

El análisis se realizó en las muestras de los niveles donde se intuye que hay materia orgánica: LG1, LG2, BLG1, BLG2 y CG.

2.2.4. *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

Con esta técnica se estudió la muestra LG1. Una parte de la muestra sin tratar se tomó y se embutió para compactarla en una resina epoxi. Posteriormente, el fragmento compactado fue cortado con un disco de diamante y una de sus superficies fue pulida con pasta de diamante. La muestra fue cubierta en un vaporizador de carbón, para que el material sea conductor y permita la evacuación de electrones en el estudio de microscopía electrónica. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) de la marca MERLIN de Carl Zeiss del Centro de Instrumentación Científico-Técnico de la Universidad de Jaén (Fig. 8).



Figura 8. Microscopio electrónico de barrido empleado.

El SEM nos permite una caracterización a escala micrométrica de la morfología, estructura y composición química incidiendo un barrido de haz de electrones sobre la muestra. Al incidir, se generan dos tipos de electrones: secundarios (SE), con una resolución de imagen de 0.8 nm a 15 Kv, de 1,4 nm a 1kv y 2,4 nm a 0,2 Kv; y retrodispersados (BSE), con un potencial de aceleración comprendido entre 0.02 V y 30 kV.

2.2.5. Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)

Esta técnica fue aplicada sobre muestras seleccionadas (LG1, LG2, LG6 y BLG2). Se trata de un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución STEM PHILIPS CM20 (CIC – Universidad de Granada) (Fig. 9).

La microscopía electrónica de transmisión se basa en acelerar un haz de electrones a una velocidad que pueda atravesar la muestra para obtener imágenes.

Un requisito para la correcta aplicación es que el polvo debe de ser extremadamente fino, por lo que la técnico de laboratorio realizó otra molienda con un mortero de ágata. A continuación, se diluye en un disolvente orgánico (en este caso se utilizó agua). Para conseguir una óptima dispersión, se lleva la solución a un baño de ultrasonidos. Esta preparación se vierte en una rejilla cubierta de carbón, donde finalmente, una vez seca, se puede observar al microscopio electrónico de transmisión.



Figura 9. Microscopio electrónico de transmisión de alta resolución

Con este método se obtienen imágenes con una resolución máxima de 2.7 Å entre puntos y de 1.4 Å entre líneas. Además, este microscopio permite el microanálisis de zonas muy reducidas mediante dispersión de energía de rayos X (EDX), cualitativa y cuantitativamente a través de un sistema EDAX. A partir de los microanálisis de las distintas fases minerales se han calculado las fórmulas químicas ajustando a oxígenos: las micas y esmectitas se han ajustado a 11 oxígenos, las cloritas a 14, y 10,5 oxígenos para las paligorskitas.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización mineralógica de los niveles por XRD.

Los datos mineralógicos aportados por la técnica de difracción de rayos X nos indican que en todas las muestras, salvo alguna excepción, aparecen los mismos tipos de minerales.

En la zona de Llano Gálvez (muestras LG), y por lo tanto, en materiales más recientes, aparecen cloritas (sobre 14 Å), esmectitas (14 Å -12,4 Å), yeso (7,6 Å), caolinita (7,16 Å), cuarzo (3,34 Å), calcita (3,03 Å), micas (moscovita e illita, sobre 10

Å), feldespatos (3,19 Å) y dolomitas (2,88 Å). Hay diferencias entre la mineralogía de las muestras de esta zona (Anexo 1).

Como vemos en la Fig. 10 y Fig. 11, en los difractogramas de las muestras ricas en materia orgánica (LG1 y LG2), indican que hay calcita en la LG1, pero no en la LG2. Además, podemos observar cómo se aprecian esmectitas, aunque en LG2 (Fig. 11), son más evidentes. Para la confirmación de la presencia de esmectitas fue necesario el uso de la microscopía electrónica.

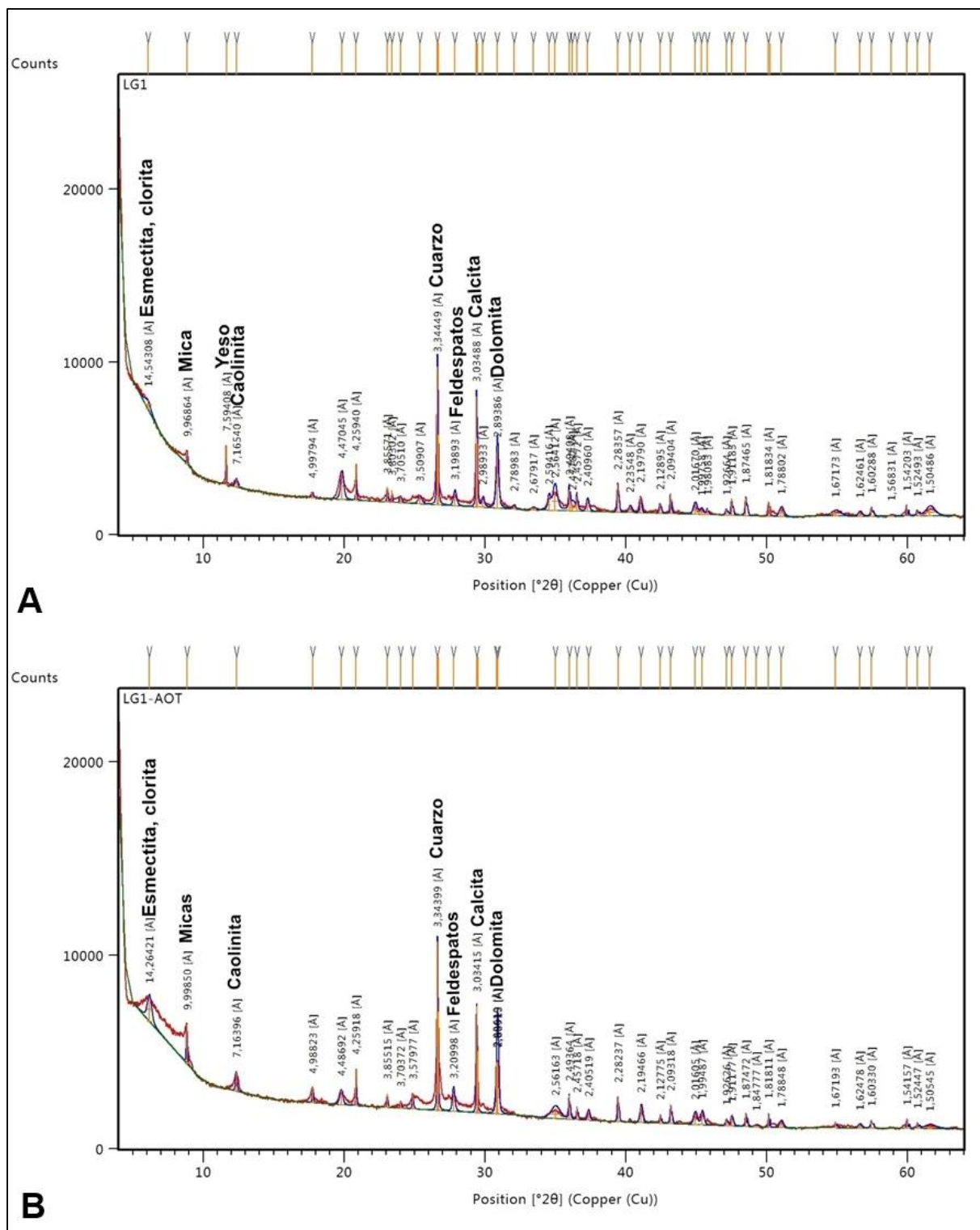


Figura 10. (A) Difractograma de rayos X (método de polvo) de la muestra LG1. (B) Difractograma de rayos X del agregado orientado total (AOT) de la muestra LG1.

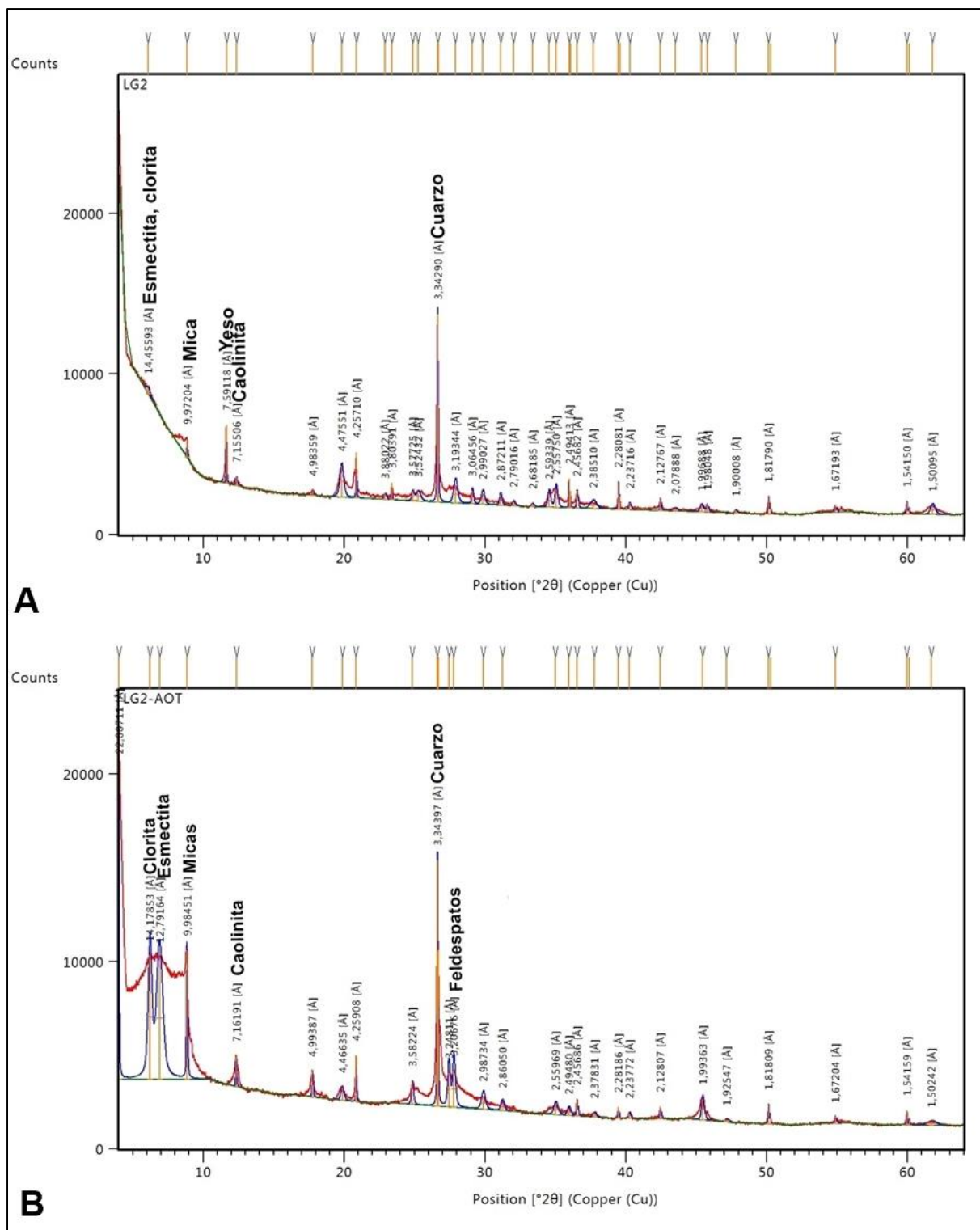


Figura 11. (A) Difractograma de rayos X (método de polvo) de la muestra LG2. (B) Difractograma de rayos X del agregado orientado total (AOT) de la muestra LG2.

Por otra parte, en los materiales más antiguos correspondientes al basamento, observamos cómo se correlacionan los niveles, aunque sea de distintas épocas, se

observa como BLG1 (Fig. 12) y BLG2 (Fig. 13), tienen la misma composición que LG1 y LG2.

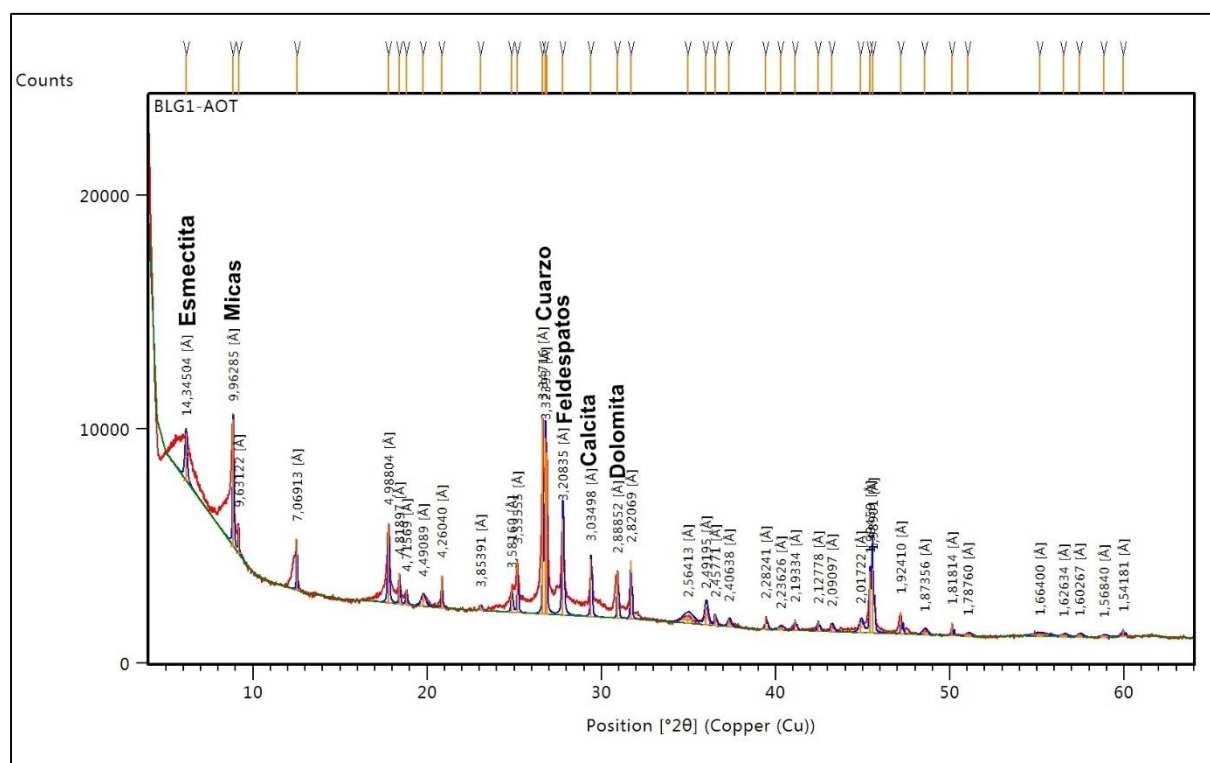


Figura 12. Difractograma de rayos X del agregado orientado total (AOT) de la muestra BLG1.

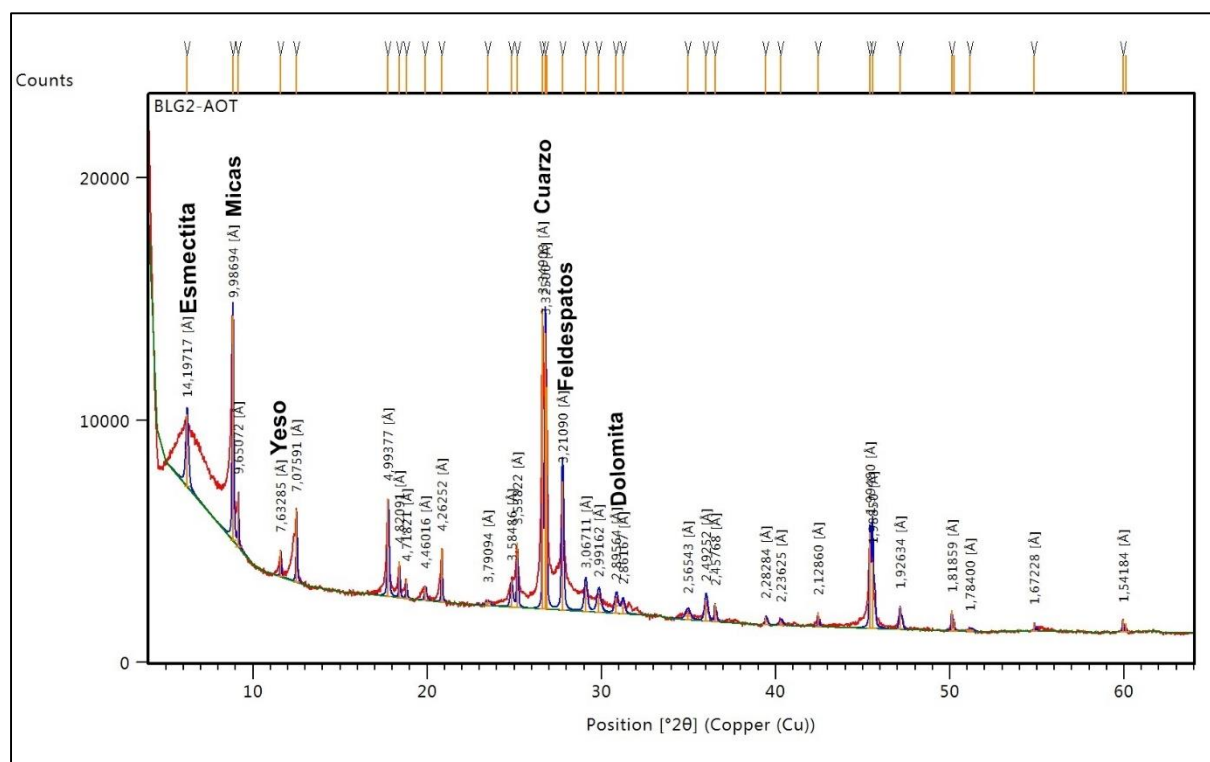


Figura 13. Difractograma de rayos X del agregado orientado total (AOT) de la muestra BLG2.

En lo referente a la última zona de muestreo, correspondiente a la carretera de Galera, coinciden algunos de los minerales con los de las otras ubicaciones (Fig. 14).

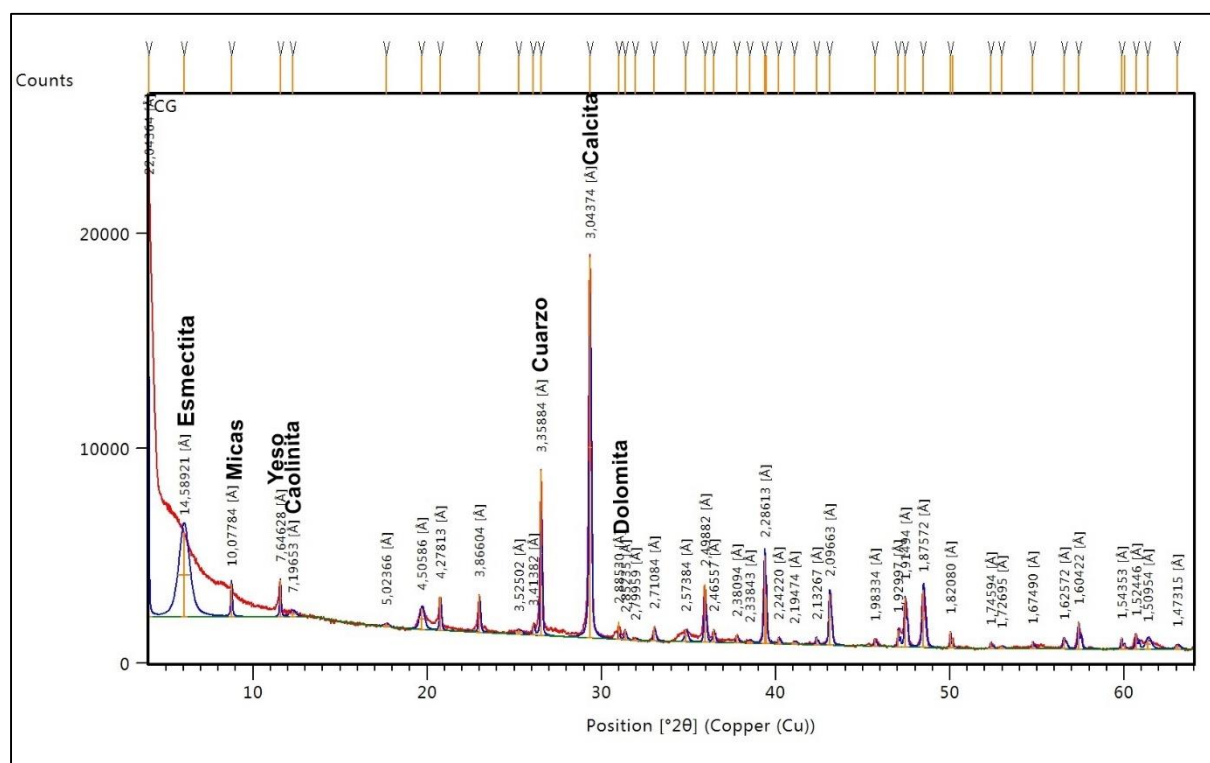


Figura 14. Difractograma de rayos X de la muestra CG (en polvo).

No hay cambios significativos entre los resultados que nos dan los difractogramas en polvo y los agregados orientados totales.

En el tratamiento con etilenglicol (AO+ET), sí que se pudo observar en LG1 la presencia de esmectita, aunque en LG2 seguía sin verse claramente. Analizamos también la muestra LG5 al crear confusión un pico que sobresale sobre 14 Å, que finalmente desaparece tras el tratamiento con etilenglicol.

3.2. Caracterización morfológica. SEM.

Las imágenes de SEM de la muestra LG1 embutida en resina permiten evaluar las relaciones texturales entre los elementos que la componen, entre los que destacan varias estructuras orgánicas, además de minerales de interés.

Las imágenes de BSE permiten observar fragmentos de restos fósiles de plantas que se disponen paralelos a la laminación (Fig. 15). El tamaño de estos fragmentos oscila entre varias μm y mm . En el interior de los fragmentos se distingue claramente

el sistema de vasos leñosos conductores de las plantas. Puntualmente, algunos fragmentos están cubiertos por la precipitación de carbonato (Fig. 16). Junto a los restos de plantas se identifican fragmentos angulosos de minerales detríticos (mayoritariamente cuarzo y micas con cantidades menores de calcita) de pequeño tamaño (generalmente inferior a $5\mu\text{m}$). El conjunto de fragmentos se encuentra inmerso en una matriz de cristales de arcillas de tamaño muy pequeño ($<2\mu\text{m}$) en la que se identifican lamelas irregulares de esmectita y fibras nanométricas de paligorskita (Fig. 17).

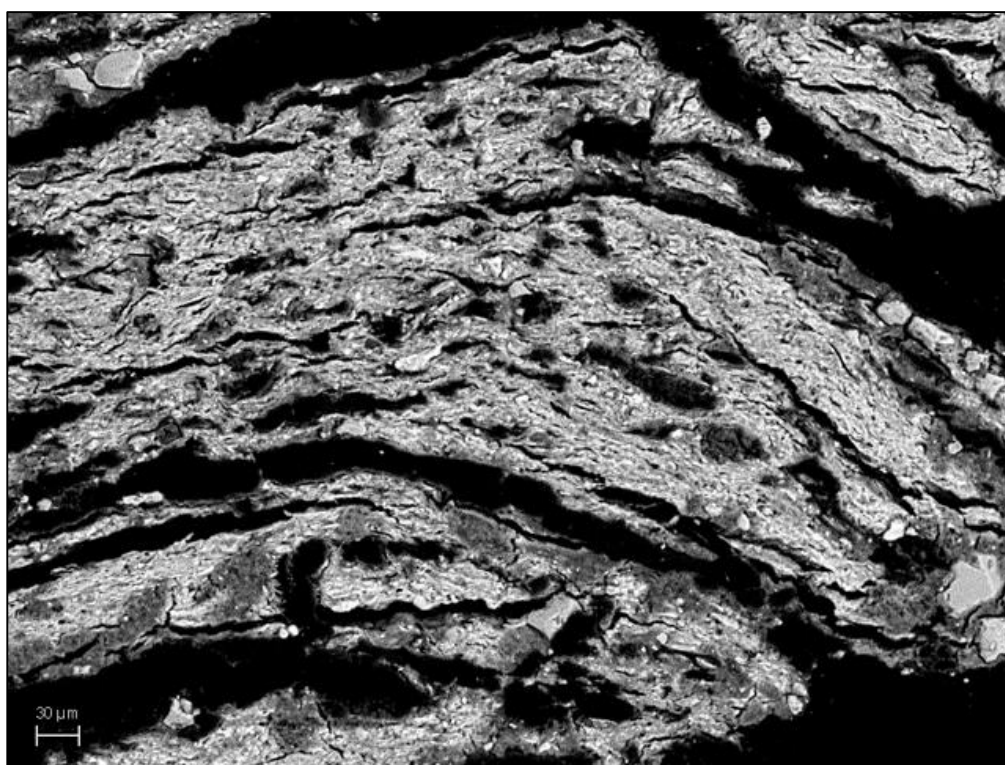


Figura 15. Fragmentos de restos fósiles de plantas paralelos a la laminación (nivel negro LG1).

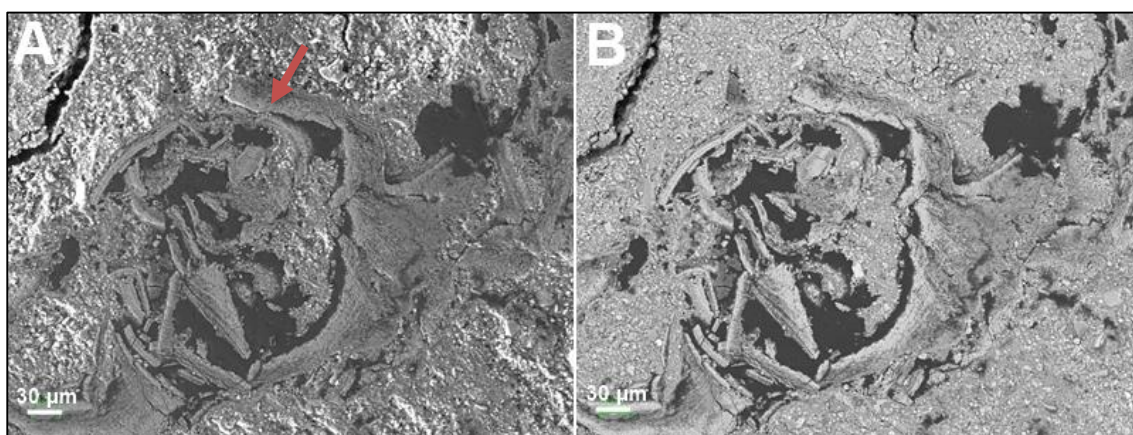


Figura 16. (A) Fósiles de restos de plantas con travertino (imagen de electrones secundarios). (B) Fósiles de restos de plantas con travertino (imagen de electrones retrodispersados). Nivel negro LG1.

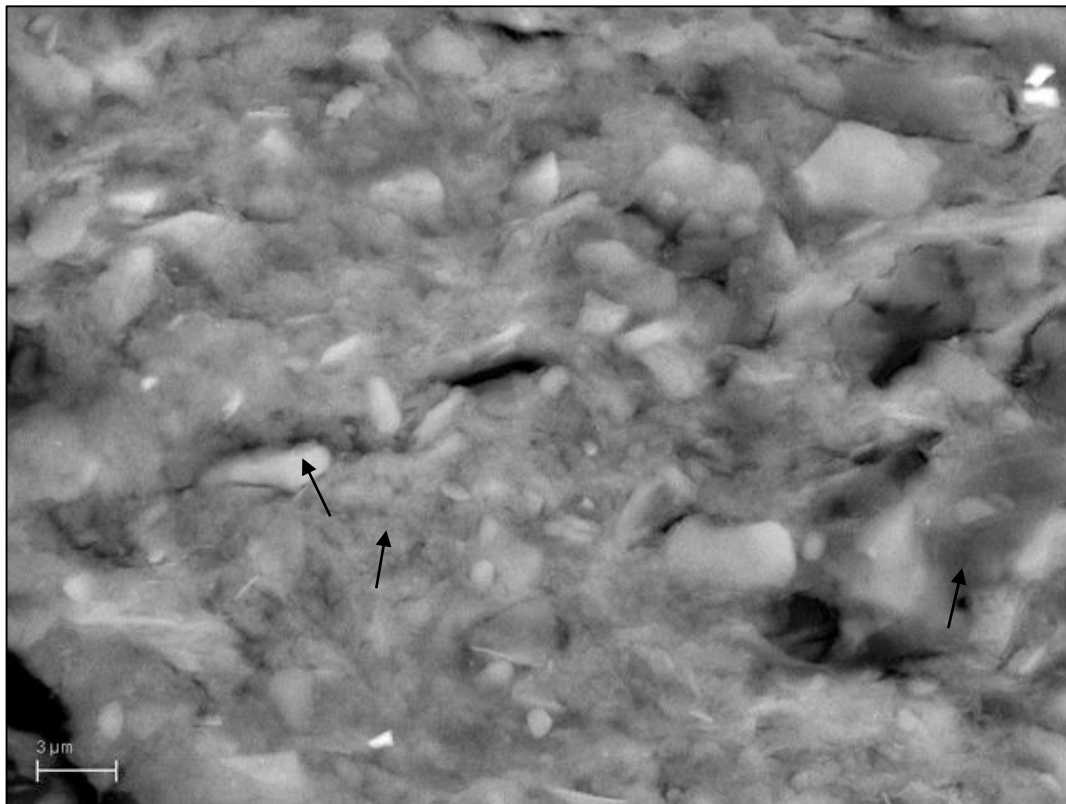


Figura 17. Matriz del nivel negro LG1 con paligorskita y esmectitas.

3.3. Datos obtenidos con HRTEM

Los datos obtenidos en el microscopio electrónico de transmisión de alta resolución permitieron confirmar la existencia de esmectita. Una de las características que más se aprecia es el hábito masivo que presenta este filosilicato (Fig. 18).

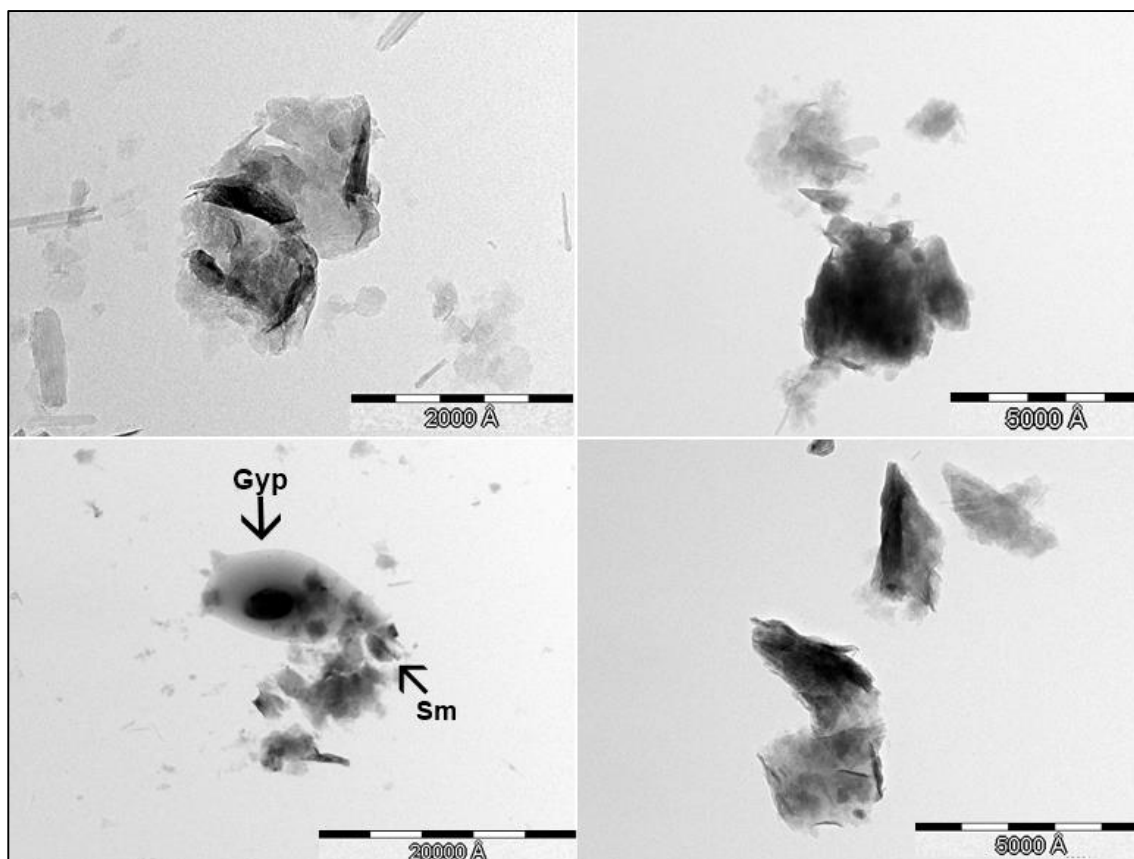


Figura 18. (A) Esmeclita en LG1. (B) Esmeclita en LG2. (C) Esmeclita (Sm) en BLG2, con yeso (Gyp). (D) Esmeclita en LG6.

Además se identificó la presencia de paligorskita (Fig.19) en las muestras estudiadas donde hay presencia de materia orgánica (LG1 y LG2). También aparece en BLG2, pero no es tan abundante.

Este filosilicato tiene un hábito fibroso. A menudo aparece asociado a cuarzo caolinita, esmeclitas e illita.

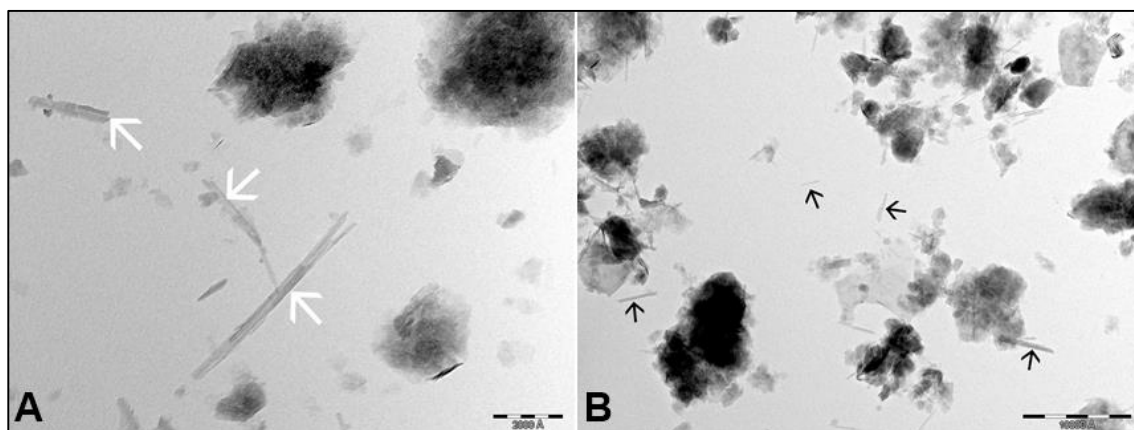


Figura 19. Paligorskita en LG1 (A). Paligorskita en LG2 (además de feldespato potásico, illita y sepiolitas) (B).

Además de estos dos minerales que pueden ser de vital importancia a la hora de analizar su origen, obtuvimos otras imágenes de otros minerales que aparecen en difracción de rayos X que tienen interés en este estudio: moscovita, yeso, feldespato potásico, calcita, cuarzo y clorita (Fig. 20).

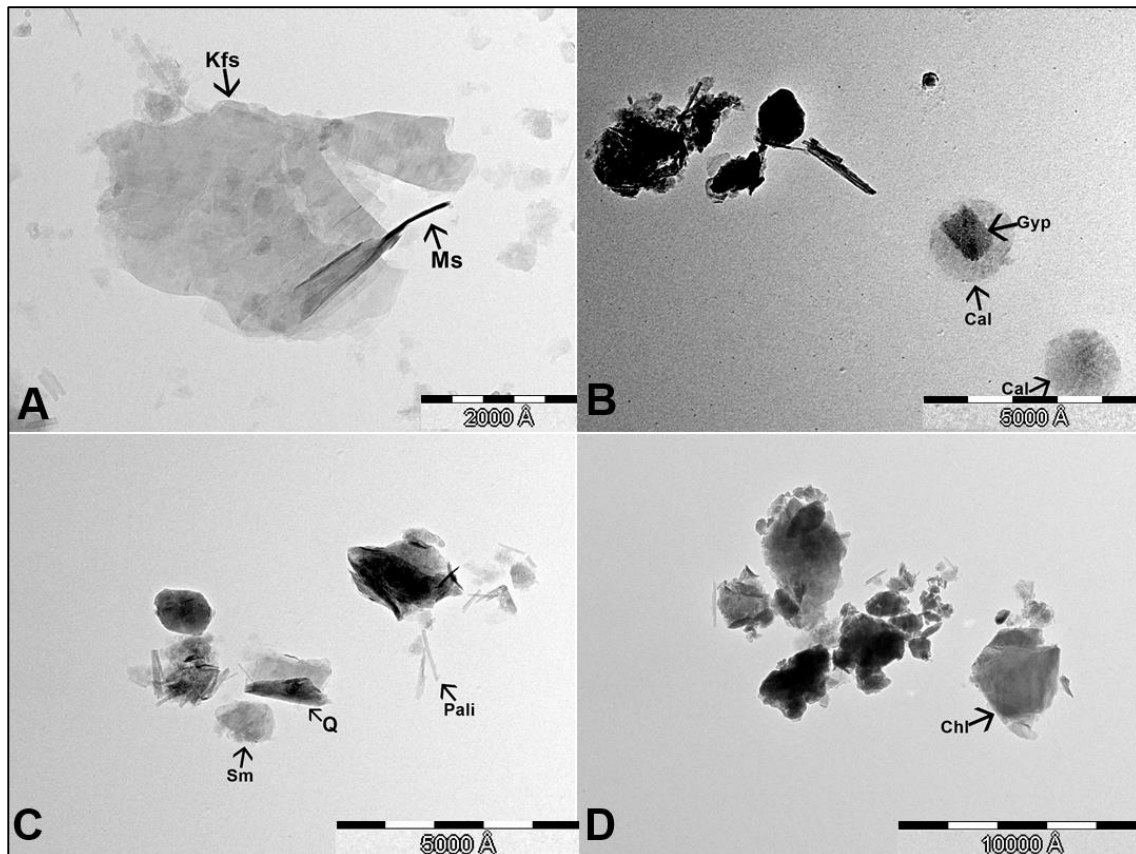


Figura 20. (A) Moscovita (Ms) incrustada en un feldespato potásico (Kfs) de la muestra LG1. (B) Calcitas (Cal), una de ellas está recubriendo a un yeso (Gyp) en LG1. (C) Cuarzo (Q), esmectitas (Sm) y paligorskitas (Pali) en LG1. (D) Clorita (Chl) en LG6.

Además de minerales, también se observaron materiales orgánicos en LG2 (Fig. 21).

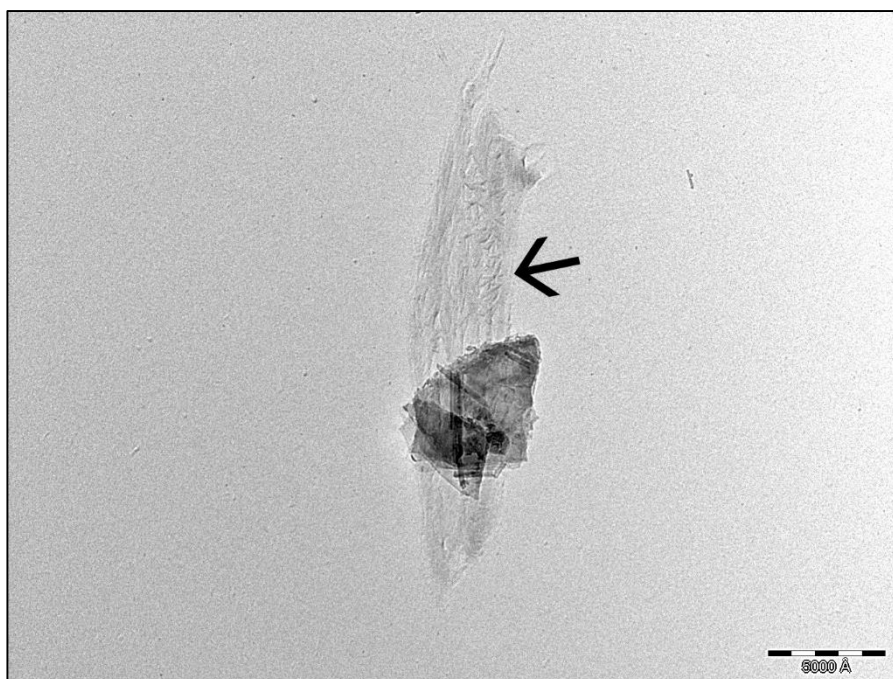


Figura 21. Material orgánico en LG2.

Se han obtenido fórmulas cristaloquímicas a partir de los análisis químicos obtenidos con este método.

Se hicieron 4 análisis de las micas de distintas muestras. Podemos observar que solo tiene Na uno de los análisis de LG1 (Tabla 1). El análisis 10 de LG2, es el de una mica de tipo illita y, por eso, el Fe se ha considerado Fe^{3+} .

	Análisis	Si	AlIV	AlVI	Fe	Mg	Σ oct.	K	Na	Σ inter.	O	OH
LG1	11	3,23	0,77	1,84	0,04	0,13	2,00	0,57	0,32	0,89	10	2,00
	12	3,42	0,58	1,62	0,25	0,25	2,11	0,44	0,12	0,56	10	2,00
LG6	4	3,35	0,65	1,72	0,11	0,20	2,02	0,82	0,00	0,82	10	2,00
LG2	10	3,21	0,79	1,70	0,18	0,30	2,18	0,55	0,00	0,55	10	2,00

Tabla 1. Fórmulas químicas de micas analizadas en HRTEM.

Para la clorita se obtuvieron dos análisis. En ambos casos, la clorita está alterada a esmectitas (Tabla 2).

	Análisis	Si	AlIV	AlVI	Fe	Mg	Mn	Σ inter.	O	OH
LG6	1	3,37	0,63	1,77	2,92	0,72	0,02	5,43	10	8
BLG2	6	3,59	0,41	1,78	2,38	1,16	0,00	5,32	10	8

Tabla 2. Fórmulas químicas de cloritas analizadas en HRTEM.

Solo se observa paligorskita en las muestras donde hay materia orgánica. Observamos cómo en el análisis 1 de LG1 y 5 de BLG2 aparecen con contenidos altos en silicio y una presencia de calcio y potasio en dos de los análisis en pequeñas cantidades (Tabla 3). Este mineral es alto silicio, por lo que casi toda la parte tetraédrica lo ocupa todo este elemento, y en ocasiones, lo completa como apreciamos en el análisis 1 y 5.

		Σ					Σ					
	Análisis	Si	AlIV	AlVI	Fe	Mg	oct.	Ca	K	inter.	O	OH
LG1	1	4,18	0	0,76	0,16	0,79	1,72	0,03	0,02	0,05	10	1
	8	3,99	0,01	0,94	0,35	0,73	2,03	0	0	0	10	1
	13	3,99	0,01	0,82	0,41	0,65	1,89	0	0	0	10	1
LG2	4	3,86	0,14	0,79	0,36	0,77	1,93	0,07	0	0,07	10	1
	9	3,63	0,37	0,72	0,51	0,83	2,07	0	0	0	10	1
BLG2	5	4,08	0	0,92	0,13	0,77	1,82	0	0	0	10	1

Tabla 3. Fórmulas químicas de paligorskitas analizadas en HRTEM.

Otra evidencia más de la presencia de esmectita en nuestras muestras ha sido la gran cantidad de éstas encontradas para realizar análisis. No se muestran diferencias significativas entre ellas, aunque en los análisis de BLG2 se observa una contaminación con clorita (Tabla 4). Además, es el único mineral presente en todas las muestras que llevamos a analizar. Lo más destacable en estos análisis es la variación en aluminio y hierro de todas las muestras, los demás elementos se mantienen dentro de unos valores estables.

		Σ					Σ					
	Análisis	Si	AlIV	AlVI	Fe	Mg	oct.	Ca	K	inter.	O	OH
LG1	2	3,49	0,51	1,48	0,51	0,53	2,53	0,05	0,17	0,23	10	2
	3	3,61	0,38	1,28	0,63	0,40	2,32	0,07	0,42	0,49	10	2
	4	3,75	0,25	1,38	0,51	0,39	2,29	0,04	0,34	0,38	10	2
	5	3,82	0,18	1,28	0,54	0,41	2,24	0,06	0,35	0,41	10	2
	7	3,73	0,27	1,24	0,56	0,45	2,25	0,13	0,28	0,41	10	2
	9	3,63	0,37	1,86	0,27	0,27	2,39	0,05	0,21	0,27	10	2
LG2	1	3,76	0,23	1,50	0,41	0,48	2,40	0	0,09	0,09	10	2
	2	3,72	0,27	1,29	0,63	0,41	2,33	0,05	0,15	0,20	10	2
	5	3,79	0,21	1,37	0,52	0,41	2,31	0,04	0,13	0,17	10	2
	6	3,83	0,17	1,53	0,46	0,26	2,25	0,04	0,17	0,20	10	2
	7	3,68	0,31	1,74	0,29	0,31	2,34	0,04	0,29	0,33	10	2

	8	3,80	0,19	1,27	0,61	0,41	2,29	0,02	0,14	0,17	10	2
BLG2	2	3,60	0,39	1,47	0,56	0,34	2,37	0	0,34	0,34	10	2
	3	3,78	0,22	1,18	0,64	0,39	2,22	0,04	0,45	0,49	10	2
	4	3,92	0,08	1,69	0,26	0,30	2,25	0	0,22	0,22	10	2
LG6	2	3,77	0,23	1,38	0,54	0,46	2,38	0,15	0,15	0,29	10	2

Tabla 4. Fórmulas químicas finales de esmectitas analizadas en HRTEM.

3.4. Análisis elemental del carbono

Los análisis del carbono total correspondiente a los niveles negros se muestran en la Tabla 5. Se observa que los valores más altos en carbono corresponden a las muestras de la carretera de Galera (CG), seguidas de los niveles de materia orgánica más recientes correspondientes al Llano Gálvez (LG1 y LG2). Los valores más bajos coinciden con las dos muestras del basamento (BLG1 y BLG2).

También se obtuvieron datos del porcentaje en nitrógeno, hidrógeno y azufre (Anexo 2).

Muestra	%C
LG1	4,4807
LG1	4,5150
LG2	3,6152
LG2	3,7725
BLG1	1,6496
BLG1	1,5950
BLG2	0,7403
BLG2	0,7481
CG	5,8237
CG	5,7972

Tabla 5. Porcentaje de carbono presente en las muestras seleccionadas.

4. DISCUSIÓN

4.1. Integración de resultados de las terrazas de Llano Gálvez

Los datos de difracción de rayos X muestran que los minerales predominantes en la secuencia estudiada son calcita y cuarzo, que aparecen en todas las asociaciones minerales de los sedimentos caracterizados. Dolomita y yeso pueden localizarse puntualmente con cantidades significativas. Respecto a los filosilicatos, la paragénesis se caracteriza por la presencia generalizada de micas (aunque con un amplio intervalo de variación) y la concentración de paligorskita o caolinita en niveles específicos. Los feldespatos sólo se encuentran de forma esporádica.

La asociación mineral cambia a lo largo de la secuencia sedimentaria. La calcita es el mineral dominante en los niveles de limos, margas y capas ricas en fragmentos de travertinos. Además, existen cantidades muy significativas de yeso en los limos de la parte inferior de la columna estratigráfica y de dolomita en los de la parte inferior. Respecto a los minerales de la arcilla, estos niveles se caracterizan por la presencia de picos muy bien definidos en torno a 10 Å y 9,7 Å, lo que sugiere cantidades muy significativas de micas, moscovita y paragonita.

Por otro lado, el cuarzo es el mineral que domina las asociaciones de los niveles negros ricos en restos de plantas. Además, la intensidad de los picos en torno a 4,5 Å indica que el contenido total en arcillas de estos niveles es muy superior al del resto de materiales de la secuencia. En estos casos, la presencia de paligorskita sobresale en la asociación de arcillas, con su pico característico a 10,6 Å. La existencia de picos en torno a 14 Å revela la presencia de esmectita.

4.2. Interpretación de las asociaciones de minerales de la arcilla

Las asociaciones de minerales de la arcilla en cuencas no marinas constituyen un registro potencial de cambios morfológicos, tectónicos y climáticos. La litología del área fuente, la tectónica y la evolución del drenaje y de las condiciones climáticas pueden influir significativamente en la hidroquímica de la cuenca determinando la distribución y evolución de las asociaciones de minerales de la arcilla (Sáez et al., 2003). Cuando las cuencas son pequeñas, suelen tener aportes de muy pocos tipos de rocas, lo que provoca que las asociaciones de arcillas sean homogéneas, salvo cuando cambios geomorfológicos, tectónicos o climáticos afectan a los procesos de meteorización y erosión en las áreas fuente o fuerzan cambios ambientales significativos en la cuenca.

Los cambios ambientales sindeposicionales están frecuentemente relacionados con el balance hidrológico de la cuenca, el cual, aparte del clima, también depende del contexto tectónico que condiciona el sistema de drenaje.

El cambio de la hidroquímica deposicional implica variaciones de las concentraciones iónicas y pH de las aguas de la cuenca y de las intersticiales que pueden influir en la autogénesis de minerales (Sáez et al., 2003).

Las áreas fuente distales de la cuenca permiten la formación de asociaciones detríticas de minerales de la arcilla en los paquetes de limos y margas, formadas por moscovita, paragonita y caolinita. Las condiciones pantanosas en las que se desarrollaron los niveles ricos en materia orgánica produjeron un cambio sustancial en las condiciones hidroquímicas propiciando un ambiente salino que promovió la cristalización de paligorskita.

4.3. Implicaciones climáticas y de área fuente

Las proporciones minerales sugieren que el ambiente sedimentario en el que se depositaron las terrazas lacustres del área de Llano Gálvez fue muy sensible a las oscilaciones climáticas y cambios ambientales asociados del Cuaternario. Las características de la asociación mineral de depósitos lacustres en depresiones cerradas semiáridas pueden reflejar cambios climáticos que produjeron modificaciones del nivel del lago y de su hidroquímica (Müller y Wagner, 1978).

Los cambios ambientales están marcados por la relación inversa que muestra la cantidad de calcita respecto a las de cuarzo y arcilla total. Un incremento de la proporción de arcillas podría relacionarse con un elevado grado de meteorización química y alta erosión de las arcillas de los suelos, asociada a un clima húmedo, mientras que bajos contenidos en arcillas sugieren predominio de la meteorización física, suelos estables y/o tasas de erosión bajas debidos a climas más secos (Ülgen et al., 2012).

El depósito de calcita de las terrazas lacustres se asociaría principalmente con la contribución de los aportes detríticos de origen fluvial procedentes de las rocas carbonatadas de las áreas fuente circundantes en periodos de avenidas producidos por elevados niveles de precipitaciones o episodios de fusión de los glaciares de las áreas fuente. Estos periodos húmedos están representados por elevados contenidos

en filosilicatos detríticos. La moscovita y la paragonita son los principales minerales de la arcilla de estos niveles.

El aumento de la temperatura, la evaporación y de la restricción de las aguas del lago queda recogido mediante la siguiente sucesión mineral: calcita detrítica + filosilicatos detríticos (moscovita, paragonita) $\Rightarrow$ cantidad de arcilla total + cuarzo $\Rightarrow$ esmectita $\Rightarrow$ paligorskita $\Rightarrow$ calcita autigénica (travertino). Cuando se produce un descenso de la temperatura, de la evaporación y de la restricción del lago, esta sucesión es inversa.

La presencia de niveles negros de tamaño de grano muy fino ricos en cuarzo, arcillas esmectíticas y restos de plantas dispuestos de forma paralela a la laminación, podría ser el resultado de la erosión y redepósito de suelos circundantes proximales desarrollados en condiciones relativamente húmedas que favorecieron la disolución de los carbonatos del sedimento (tipo *terra rossa*).

La formación de paligorskita nanométrica en los huecos del sedimento refleja un medio sedimentario en el que el agua del lago y de los poros del sedimento es muy salina y alcalina, probablemente como consecuencia del desarrollo de condiciones climáticas secas de alta temperatura, con elevada evaporación y bajo nivel del agua en el lago.

En algunas ocasiones estos niveles son sellados por niveles limosos ricos en calcita detrítica, moscovita y paragonita. En otros casos, los niveles negros son cubiertos por sedimentos ricos en fragmentos de travertinos ricos en calcita autigénica formada por precipitación alrededor de los órganos de plantas en condiciones superficiales con presencia de agua carbonatada cálcica. A veces, dichos restos de plantas pueden encontrarse en posición vertical de vida lo que podría interpretarse como el desarrollo "*in situ*" de dicho nivel.

La presencia de niveles negros ricos en materia orgánica con paligorskita en la secuencia endorreica lacustre del basamento sugiere que estas condiciones se repitieron a lo largo de la historia geológica de la región.

5. CONCLUSIONES

Los ambientes deposicionales estudiados muestran un carácter lacustre caracterizado por la alternancia de limos calcícticos, niveles negros ricos en materia orgánica y niveles de travertinos cuya composición mineral revela un control climático.

Los niveles de limos con calcita detrítica representan periodos de incremento del flujo de los ríos que elevan el nivel del lago y que lo nutren con sedimentos que podrían ser bastantes distales (presencia de moscovita y paragonita de los macizos metamórficos de la Sierra de la Estancias (Cúllar, Granada)). Estos periodos podrían relacionarse con periodos de fusión de los glaciares de los relieves más distales o un aumento de las precipitaciones.

El periodo húmedo permitió el desarrollo de suelos ricos en arcillas esmécticas y cuarzo y pobres en carbonato en los relieves circundantes debido a un proceso de meteorización química intensa. Este ambiente fue propicio para el desarrollo de una abundante vegetación en un ambiente pantanoso. Estos niveles fueron erosionados y depositados en el fondo del lago en periodos menos energéticos en los que el clima se va haciendo progresivamente más seco y cálido lo que reduce el nivel del lago por evaporación y produce la precipitación de paligorskita en los poros de los sedimentos más superficiales. En ocasiones, el proceso de disminución del lago se completa con emersiones que producen la formación de travertinos que ocupan posición de vida en el sedimento. En otros casos, el desarrollo de eventos de mayor energía sella estos sedimentos con niveles de limos ricos en calcita y filosilicatos detríticos.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradezco por toda la ayuda y consejos a mis tutores, Francisco Juan García Tortosa, Juan Jiménez Millán y María Isabel Abad Martínez; y a los técnicos de laboratorio de la Universidad de Jaén y de Granada por su trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

Altin, T. B., Ouahabi, M. E. y Fagel, N. (2015). Environmental and climatic changes during the Pleistocene–Holocene in the Bor Plain, Central Anatolia, Turkey, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 440, pp. 564–578.

Eugster, H.P. y Hardie, L.A. (1978). Saline lakes. In: Lerman, A. (Ed.), *Chemistry, Geology and Physics of Lakes*. Springer Verlag, New York, pp. 237–293.

Espigares Ortiz, M. P. (2010). Análisis y modelización del contexto sedimentario y los atributos tafonómicos de los yacimientos pleistocénicos del borde nororiental de la cuenca de Guadix – Baza (Tesis Doctoral). Universidad de Granada, Granada, España.

Fernández Chacón, F. (2009). Contribución al conocimiento hidrogeológico de una depresión interna en clima mediterráneo semiárido (cabecera del Guadiana Menor, Cordillera Bética) (Tesis Doctoral). Universidad de Granada, Granada, España.

Garcés, M. (1996). Magnetoestratigrafía de los sedimentos lacustres Pliocenos de la sección de Galera (Cuenca de Guadix-Baza, Cordilleras Béticas). ACTA GEOLOGICA HISPANICA, v. 29, pp. 191- 194.

García-García, F., Sánchez-Gómez, M, Navarro, V., Pla, S. (2010). Formation, infill, and dissection of a latest-Pleistocene landslide-dammed reservoir (Betic Cordillera, Southern Spain): Upstream and downstream geomorphological and sedimentological evidence. Quaternary International, v. 233, pp. 61-71.

García Tortosa, F.J., Sanz de Galdeano, C., Alfaro, P. y Ureña, M. (2007). El glacis de la cuenca de Guadix-Baza. Una superficie de referencia para el análisis tectónico y la evolución geomorfológica de la cuenca, en La cuenca de Guadix-Baza. Estructura, tectónica activa, sismicidad, geomorfología y dataciones existentes (Sanz de Galdeano, C., y Peláez, J.A., eds.), Granada, pp. 111-126.

García Tortosa, F.J., Alfaro, P., Galindo Zaldívar, J., Gibert, L., López Garrido, A.C., Sanz de Galdeano, C., and Ureña, M. (2008). Geomorphologic evidence of the active Baza Fault (Betic Cordillera, South Spain). Geomorphology, v. 97, pp. 374-391.

García-Tortosa, F.J., Alfaro, P., Sanz de Galdeano, C., Galindo-Zaldívar, J., (2011). Glacis geometry as a geomorphic marker of recent tectonics: the Guadix–Baza basin (South Spain). Geomorphology, v. 125, pp. 517–529.

Gibert L. (2006) Análisis de facies y magnetoestratigrafía de la cuenca de Baza. Ph. D. Thesis. Univ. Politècnica de Catalunya, Manresa, Spain, pp. 260.

Eugster H.P. y Hardie L.A. (1978). Saline lakes in: Lerman A. lake sediment or short cores from small lake basins. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. Springer, New York, pp. 237–289.

Hewitt, K., (1998). Catastrophic landslides and their effects on the upper Indus streams, Karakoram Himalaya, northern Pakistan. Geomorphology, v. 26, pp. 47–80.

Larrasoaña, J.C., Ortuño, M., Birks, H.H., Valero-Garcés, B., Parés, J.M., Copons, R., Camarero, L. y Bordonau, J. (2010) Palaeoenvironmental and palaeoseismic implications of a 3700-year sedimentary record from proglacial Lake Barrancs (Maladeta Massif, Central Pyrenees, Spain). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 294, pp. 83-93.

Müller G. y Wagner F. (1978). Holocene carbonate evolution in lake balaton (Hungary): a response to climate and impact of man. In: Matter, A., Tucker, M.E. (Eds.), Special Publication of the International Association of Sedimentology 2. Blackwell Science Publications, Oxford, pp. 57–81.

Peña, J.A. (1985). La depresión de Guadix-Baza. Estudios Geológicos, v. 41, pp. 33-46.

Saéz, A., Ingles, M., b, Cabrera, L. y de las Heras, A. (2003). Tectonic–palaeoenvironmental forcing of clay-mineral assemblages in nonmarine settings: the Oligocene–Miocene As Pontes Basin (Spain). Sedimentary Geology, v. 159: pp. 305–324.

Soria, J. M. y Viseras, C. (2008). La Cuenca de Guadix. Rasgos geológicos generales. Arribas, A. (Ed). Vertebrados del Plioceno superior terminal en el suroeste de Europa: Fonelas P-1 y el Proyecto Fonelas. Instituto Geológico y Minero de España, serie Cuadernos del Museo Geominero, v. 10, pp. 3-19.

Ülgen UB, Franz SO, Biltekin D., Çagatay, M. N., Roeser, P. A., Doner, L., y Thein, J. (2012). Climatic and environmental evolution of Lake Iznik (NW Turkey) over the last ~4700 years. *Quaternary International*, v. 274, pp. 88–101.

Vera, J.A. (1970). *Boletín Geológico y Minero*, v. 91, pp. 429-462.

Viseras, C. (1991). *Estratigrafía y sedimentología del relleno aluvial de la Cuenca de Guadix (Cordilleras Béticas) (Tesis Doctoral)*. Universidad de Granada, Granada, España.

Wagner, B., Reicherter, K., Daut, G., Wessels, M., Matzinger, A., Schwalb, A., Spirkovski, S., Sanxhaku, M. (2008). The potential of Lake Ohrid for long-term palaeoenvironmental reconstructions. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 259, pp. 341–356.

Wassmer, P., Schneider, J. L., Pollet, N. y Schmitter-Voirin, C. (2004). Effects of the internal structure of a rock-avalanche dam on the drainage mechanism of its impoundment, Flims Sturzstrom and Ilanz paleo-lake, Swiss Alps. *Geomorphology*, v. 61, pp. 3-17.

Weidinger, J. (1998). Case history and hazard analysis of two lake-damming landslides in the Himalayas: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 16, no. 2-3, pp. 323-331.

ANEXO 1

Muestra	Minerales con XRD
LG1	Esmectita (14,54 Å), Mica (9,96 Å), Yeso (7,59 Å), Caolinita (7,16 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,19 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).
LG1 AOT	Esmectita (14,26 Å), Mica (9,99 Å), Caolinita (7,16 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,20 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).

LG2	Esmectita (14,45 Å), Mica (9,97 Å), Yeso (7,59 Å), Caolinita (7,15 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,19 Å).
LG2 AOT	Esmectita (14,17 Å), Esmectita (12,79 Å), Mica (9,98 Å), Caolinita (7,16 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,24 Å).
LG3	Esmectita (14,40 Å), Mica (10,06 Å), Paragonita (9,72 Å), Yeso (7,66 Å), Cuarzo (3,35 Å), Feldespatos (3,33 Å), Calcita (3,04 Å), Dolomita (2,88 Å).
LG3 AOT	Esmectita (14,33 Å), Mica (9,97 Å), Yeso (7,60 Å), Cuarzo (3,34 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).
LG4A	Mica (9,99 Å), Yeso (7,63 Å), Cuarzo (3,35 Å), Feldespatos (3,21 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).
LG4A AOT	Cuarzo (3,35 Å), Calcita (3,05 Å).
LG4B	Yeso (7,63 Å), Cuarzo (3,35 Å), Calcita (3,03 Å)
LG4B AOT	Mica (9,98 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,20 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).
LG5	Mica (9,99 Å), Yeso (7,63 Å), Caolinita (7,17 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,20 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).
LG5 AOT	Mica (9,98 Å), Caolinita (7,15 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,24 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,88 Å).
LG6	Esmectita (14,25 Å), Mica (9,96 Å), Yeso (7,61 Å), Caolinita (7,07 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,20 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,90 Å).
LG6 AOT	No hay datos.
LG7	Mica (10,11 Å), Yeso (7,67 Å), Cuarzo (3,35 Å), Calcita (3,04 Å), Dolomita (2,90 Å).
LG7 AOT	Mica (10,05 Å), Cuarzo (3,34 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).
BLG1	Esmectita (14,23 Å), Mica (10,01 Å), Esmectita (9,67 Å), Yeso (7,64 Å), Caolinita (7,09 Å), Cuarzo (3,35 Å), Feldespatos (3,21 Å), Calcita (3,04 Å), Dolomita (2,89 Å).

BLG1 AOT	Esmectita (14,34 Å), Mica (9,96 Å), Caolinita (7,06 Å), Cuarzo (3,34 Å), Feldespatos (3,20 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,88 Å).
BLG2	Esmectita (14,32 Å), Mica (10,04 Å), Yeso (7,66 Å), Cuarzo (3,35 Å), Feldespatos (3,21 Å), Dolomita (2,88 Å).
BLG2 AOT	Esmectita (14,19 Å), Mica (9,98 Å), Yeso (7,63 Å), Caolinita (7,07 Å), Cuarzo (3,35 Å), Feldespatos (3,21 Å), Dolomita (2,89 Å).
CG	Esmectita (14,58 Å), Mica (10,07 Å), Yeso (7,64 Å), Caolinita (7,19 Å), Cuarzo (3,35 Å), Calcita (3,04 Å), Dolomita (2,88 Å).
CG AOT	Mica (10,03 Å), Caolinita (7,17 Å), Cuarzo (3,34 Å), Calcita (3,03 Å), Dolomita (2,89 Å).

Tabla 6. Minerales determinados mediante XRD.

ANEXO 2

Muestra	% N	% H	% S
LG1	0,1354	1,0817	0,0245
LG1	0,1274	0,9528	0,0299
LG2	0,1819	1,4060	0,2850
LG2	0,1850	1,2800	0,2030
BLG1	0,0971	1,2883	0,0816
BLG1	0,0976	1,3228	0,0614
BLG2	0,0898	0,8424	0,3715
BLG2	0,0898	0,7998	0,3410
CG	0,0507	0,6830	0,0099
CG	0,0521	0,7093	0,0127

Tabla 7. Porcentaje de nitrógeno, azufre e hidrógeno de muestras seleccionadas.