



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis morfométrico y geomorfológico y evolutivo de la Val de Sies (Villamayor, Zaragoza)



Autora

María Tierra Sánchez

Directora

Gloria Desir Valen

Departamento de Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias

2022

Índice

Resumen.....	1
Abstract	1
1. Introducción	2
2. Marco geográfico	3
3. Marco geológico.....	3
4. Marco geomorfológico.....	4
5. Metodología	6
5.1. Metodología de gabinete	6
5.1.1. Recapitulación de información bibliográfica.....	6
5.1.2. ArcGIS	7
5.2. Metodología de laboratorio	7
5.2.1. Análisis de la fracción mayor a 2 mm.....	8
5.2.2. Análisis de la fracción menor a 2 mm	8
6. Resultados	9
6.1. Análisis morfométrico de la cuenca	10
6.2. Análisis de la subsidencia en la depresión intermedia.....	11
6.3. Análisis granulométrico por tamizado	12
6.4. Análisis granulométrico por difracción láser.....	14
6.5 Análisis por difracción láser.....	15
6.6. Análisis de extracto de pasta saturada	17
7. Discusión	17
8. Conclusión	22
9. Bibliografía	22
Anexos	

Resumen

La Val de Sies, en el término municipal de Villamayor del Gállego (Zaragoza), presenta como principales características su orientación y dimensiones. Su singularidad radica en su situación en la confluencia del valle del Gállego con el valle del Ebro y en su dirección NNW-SSE acabando en un abanico aluvial que define la "esquina" o límite entre ambos valles.

Otra de las singularidades que presenta esta val es el drenaje. En su sector superior presenta un cauce incidido bien definido que desaparece en el sector medio, en una zona de drenaje difuso para, hacia la zona distal, quedar encajado en los márgenes del abanico. Como consecuencia de ello, el abanico aluvial queda topográficamente más alto y desconectado de drenaje general de la val.

Uno de los objetivos que se plantean en este TFG, además de caracterizar morfométricamente y analizar geomorfológicamente la cuenca de drenaje de esta val, es establecer la posible incidencia de los procesos de subsidencia en el desarrollo de ese tramo intermedio. El otro objetivo que se persigue es conocer la evolución de esta cuenca y su relación con la dinámica fluvial de ambos ríos, Ebro y Gállego.

Palabras clave: val, geomorfología, morfometría, subsidencia.

Abstract

The main characteristics of the flat valley floor of Sies, in the municipality of Villamayor del Gállego (Zaragoza), are its orientation and dimensions. Its singularity lies in its location at the confluence of the Gállego valley with the Ebro valley and in its NNW-SSE direction, ending in an alluvial fan that defines the "corner" or limit between both valleys.

Another of the singularities of this valley is its drainage. In its upper sector it has a well-defined incised channel that disappears in the middle sector, in an area of diffuse drainage to, towards the distal area, become embedded in the margins of the fan. As a consequence, the alluvial fan is topographically higher and disconnected from the general drainage of the valley.

One of the objectives of this TFG, in addition to morphometrically characterizing and geomorphologically analyzing the drainage basin of this valley, is to establish the possible incidence of subsidence processes in the development of this intermediate section. The other objective is to know the evolution of this basin and its relationship with the fluvial dynamics of both rivers, Ebro and Gállego.

Keywords: flat valley floor, geomorphology, morphometry, subsidence.

1. Introducción

La geomorfología del entorno de Zaragoza es simple debido a que se encuentra en una zona tectónicamente estable y, además, presenta una litología homogénea compuesta principalmente por yesos. El modelado que presentan las litologías yesíferas consisten en una red de valles de fondo plano, localmente llamadas vales, que son valles en forma de U originados por el relleno de material proveniente de los márgenes, y barrancos de incisión lineal que dividen los relieves alomados de las formaciones yesíferas. También se pueden encontrar procesos de subsidencia debida a los procesos de karstificación de las facies evaporíticas y que puede convertirse en un agente modelador o un riesgo en el entorno.

La zona de estudio, la Val de Sies, en el término municipal de Villamayor del Gállego (Zaragoza), presenta cada uno de estos modelados. Se trata de una pequeña cuenca de drenaje con dirección NNW-SSE compuesta por un valle de fondo plano localmente incidido, un gran abanico aluvial en su zona distal y una depresión cerrada situada entre ambos. Se sitúa en la margen izquierda del río Gállego, en la zona de confluencia con el río Ebro. En esta zona, el río Gállego crea un valle asimétrico llegándonos a encontrar en su margen derecho hasta un total de 7 terrazas escalonadas y en su margen izquierdo un sistema de glacis encajados que desciende desde los relieves estructurales de la Sierra de Alcubierre hasta los niveles de terraza más bajos (Benito, 1989).

El drenaje de la val es singular ya que en su sector superior presenta un barranco de incisión lineal incidido que desaparece en el sector medio cuando enlaza con la depresión intermedia. Esta depresión tiene un drenaje difuso y una dolina de sufusión en el fondo. La presencia de esta dolina indica el control de la subsidencia en la evolución de la cuenca. En la zona distal el drenaje va por dos vales de menores dimensiones que se sitúan en ambos márgenes del abanico aluvial de modo que este queda desconectado del drenaje actual y topográficamente más elevado.

Con lo mencionado anteriormente, además de las dimensiones del abanico aluvial en comparación a las de su cuenca de drenaje, hace suponer que su formación no coincide con las condiciones actuales. Debido a ello, se piensa que su evolución ha estado controlada por los procesos de subsidencia y por la evolución del río Gállego en su tramo final dado que enlaza lateralmente con el nivel T4. Benito (1989) indica que la terraza T4 del río Gállego presenta en su tramo final un engrosamiento ya que su base se encuentra 90 m por debajo del cauce actual.

Por tanto, los objetivos que se persiguen en el presente trabajo son:

- Analizar morfométrica y geomorfológicamente la Val de Sies para establecer cuál ha sido su evolución y cuáles son las relaciones espaciales con otras formas presentes.
- Analizar los procesos de subsidencia que han afectado en su evolución a la val.
- Establecer las posibles correlaciones entre la dinámica fluvial de los ríos Gállego y Ebro y la evolución de la cuenca de drenaje.
- Conocer las relaciones genéticas entre el abanico aluvial, la depresión intermedia y la val, dado que en la actualidad se encuentra desconectado de la red de drenaje de la val y topográficamente colgado por encima de ella.

2. Marco geográfico

La Val de Sies se sitúa en el término municipal de Villamayor del Gállego, próxima a la ciudad de Zaragoza (España), en la zona de confluencia del río Ebro con el río Gállego (fig 1). La zona presenta un clima mediterráneo con unas precipitaciones anuales de 320 mm y una temperatura media de 15,3°C (Cuadrat et al., 2014). Es una pequeña cuenca, de unos 6 km², que se encuentra en la margen derecha del río Gállego en su confluencia con el río Ebro.

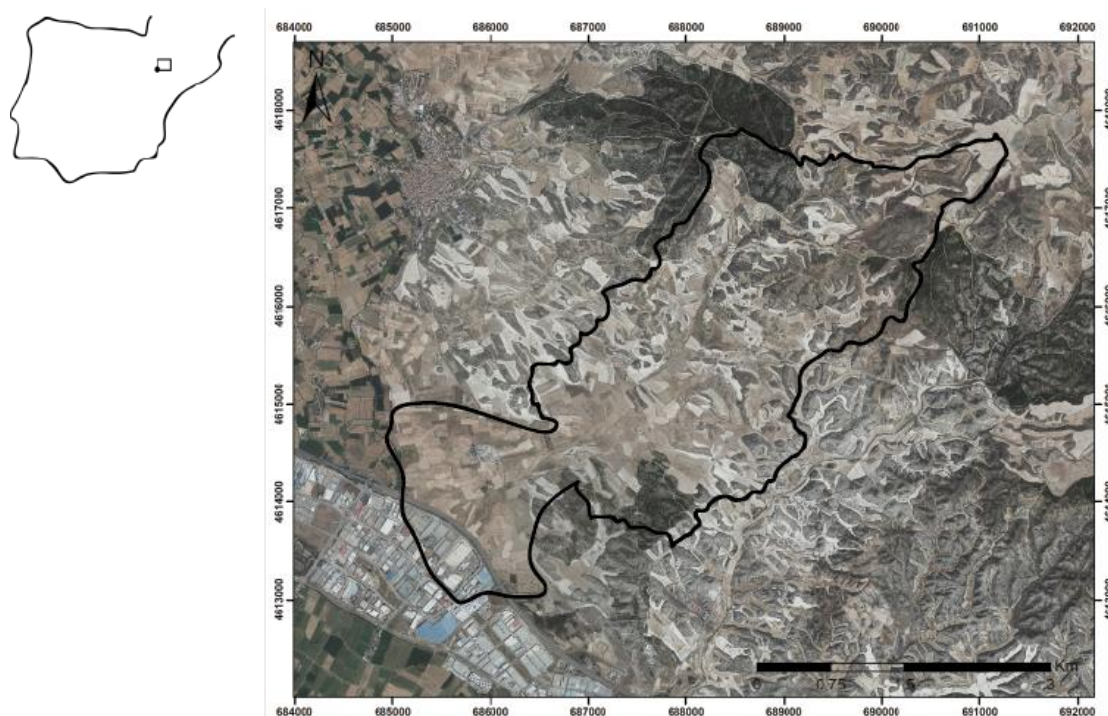


Figura 1. Situación de la zona de estudio.

3. Marco geológico

La Val de Sies se sitúa en la parte central de la Cuenca del Ebro. La Cuenca del Ebro es la cuenca de antepaís de los Pirineos siendo sus límites la Cordillera Pirenaica, la Cordillera Ibérica y las Catalánides (Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C., 1998). Durante el Eoceno superior se convirtió en una cuenca endorreica que desarrolló un sistema de abanicos aluviales con el depósito de sedimentos evaporíticos (sistema playa-lake) y carbonatados. En las zonas distales de la cuenca encontramos conglomerados y areniscas y hacia el depocentro la presencia de arcillas, margas, calizas y evaporitas (Benito et al., 1998).

Litológicamente destacan la formación Zaragoza constituidas por depósitos evaporíticos y la formación Alcubierre representada por depósitos carbonatados al N de la zona de estudio. La formación Zaragoza está compuesta por yesos masivos y limos yesíferos de tonos claros o azulados. En algunas zonas podemos encontrarlas alternando con margas y arcillas yesíferas. Sobre ella se ha depositado la formación Alcubierre que está compuesta por calizas alternadas con margas y yesos en la base y calizas masivas hacia techo, acabando con un paquete de areniscas (Quirantes, 1978). En esta formación puede haber presencia de nódulos de sílex y calizas con óxidos de hierro (Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C., 1998). A continuación, se incluye en la figura 2 el mapa geológico de la zona de estudio.

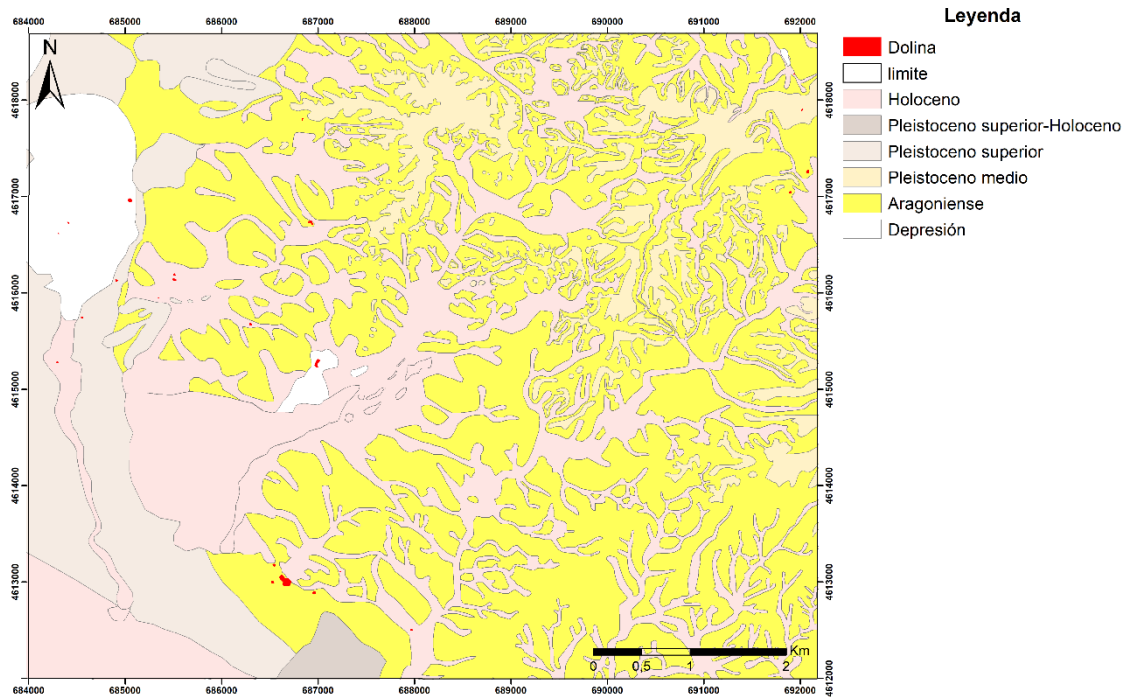


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio (modificado del magna hojas nº355 (Leciñena) y nº384 (Fuentes de Ebro)).

4. Marco geomorfológico

Como se ha comentado anteriormente, la zona de estudio se sitúa en la zona central de la Depresión del Ebro en la confluencia de los ríos Ebro y Gállego. En este sector, el río Gállego presenta una clara disimetría en su valle que puede observarse en el desarrollo de las terrazas. En la margen derecha aparecen representados 6 niveles de terraza, T1 a T6, mientras que en la margen izquierda aparecen representados 4 niveles, T1 a T4. Además, esta margen presenta un modelado constituido por varios niveles de glacis encajados que parten de los relieves estructurales de la Sierra de Alcubierre y que enlazan en su zona distal con el nivel de terraza T4 y los abanicos aluviales.

Los depósitos de terraza presentan una edad Pleistocena-Holocena y están compuestos por conglomerados con cantos de cuarcitas, calizas y granitos alterados con una matriz arenosa y limosa (Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C., 1998). Las terrazas son mixtas ya que corresponde a la zona de intersección del río Ebro con el río Gállego.

En el caso del río Gállego, debido a la disolución de la formación Zaragoza, se ha generado un surco subsidente de dirección N-S con una anchura de 8 km, que ha sido rellenado por depósitos aluviales de hasta 110 m de espesor en su zona central y que llega a los 35-40 m en la desembocadura formando una cubeta con salida al Ebro (Benito et al., 2000). Además, se han registrado tres depocentros principales situados en San Mateo (145 m), Villanueva (160 m) y entre Zaragoza y Villamayor del Gállego (190 m) (Benito et al., 1998). Benito (1989) indica que la terraza T4 se encuentra afectada por la subsidencia situándose su base 90 m por debajo del cauce actual. Ello implica que a partir de este surco subsidente las terrazas T1, T2 y T3 pasan a estar superpuestas en el tramo final mientras que aguas arriba, en el área de Zuera, se disponen como terrazas escalonadas primero sobre el sustrato y posteriormente sobre la T4 (Benito, 1989).

El modelado de las litologías yesíferas consiste en una red de vales de edad Holocena y barrancos de incisión lineal que dividen los relieves alomados. Están formadas por limos yesíferos, cantos y arcillas y se encuentran alimentadas por los glaciares. Estos glaciares son las otras grandes unidades del relieve en esta área donde se reconocen al menos 6 niveles que partiendo desde los relieves estructurales de la Sierra de Alcubierre desciende hasta alcanzar los niveles inferiores de las terrazas del Gállego. Los depósitos de glaciares de edad Pleistocena están compuestos por cantos calcáreos y yeso con una matriz arenosa-limosa (fig 3) (Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C., 1998).



Figura 3. Depósitos de glaciares del área de estudio.

El área también presenta grandes depresiones cerradas desarrolladas entre los glaciares que pueden alcanzar dimensiones de varios kilómetros como es el caso de la Perdiguera-Leciñena. Se trata de depresiones con márgenes difusos, en general capturadas por la red de drenaje, y que se desarrollan posteriormente al depósito del nivel G5 de glaciares y enlazan los fondos con el nivel G4. Se forman preferentemente en las zonas de cambio lateral de facies en las formaciones terciarias (Benito, 1989; Benito et al., 2000; Peña-Monné et al., 2020). Las depresiones de menor tamaño se desarrollan en las zonas de contacto entre los glaciares y las terrazas o entre los relieves yesíferos y los niveles aluviales cuaternarios. En alguna de ellas hay evidencias del drenaje subsuperficial por la presencia de dolinas y de sumideros en su interior.

La presencia de estas depresiones cerradas y el desarrollo de numerosas dolinas, especialmente de disolución, en la zona de estudio y en Villamayor de Gállego, son evidencias claras de los procesos de subsidencia. En Villamayor de Gállego se identifican un total de 82 dolinas. Se trata de dolinas que en la actualidad se encuentran deterioradas por la acción antrópica, pero su elevada densidad y sus dimensiones las convierten en un rasgo morfológico significativo. Por otro lado, las dolinas que se generan sobre las litofacies yesíferas son menos numerosas y sus dimensiones más restringidas. Son dolinas de sufusión (Gutiérrez et al., 2008) con diámetros menores que no suelen superar la decena de metros y una relación anchura/profundidad alta. Benito (1987) agrupa las dolinas en dos grupos: unas originadas por la subsidencia progresiva (dolinas en cubeta de bordes difusos) y otras originadas por colapso rápido y brusco (dolinas en cubeta de bordes escarpados, en ventana y en embudo). En el área de estudio se encuentra una dolina de sufusión (fig 4) en el fondo de la depresión intermedia y parece estar alineada siguiendo una dirección NNW-SSE junto con las demás dolinas del área de Villamayor del Gállego. Las depresiones generadas por subsidencia pueden provocar modificaciones locales en el sistema fluvial como cambios en el patrón del canal, cambios en su migración y su avulsión y cambios en su perfil longitudinal. Además, debido a ello se produce un engrosamiento de los depósitos aluviales (Benito et al., 2000).



Figura 4. Dolina de sufusión de la zona de estudio.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se ha realizado la cartografía geomorfológica de la zona de estudio que se muestra en la figura 5.

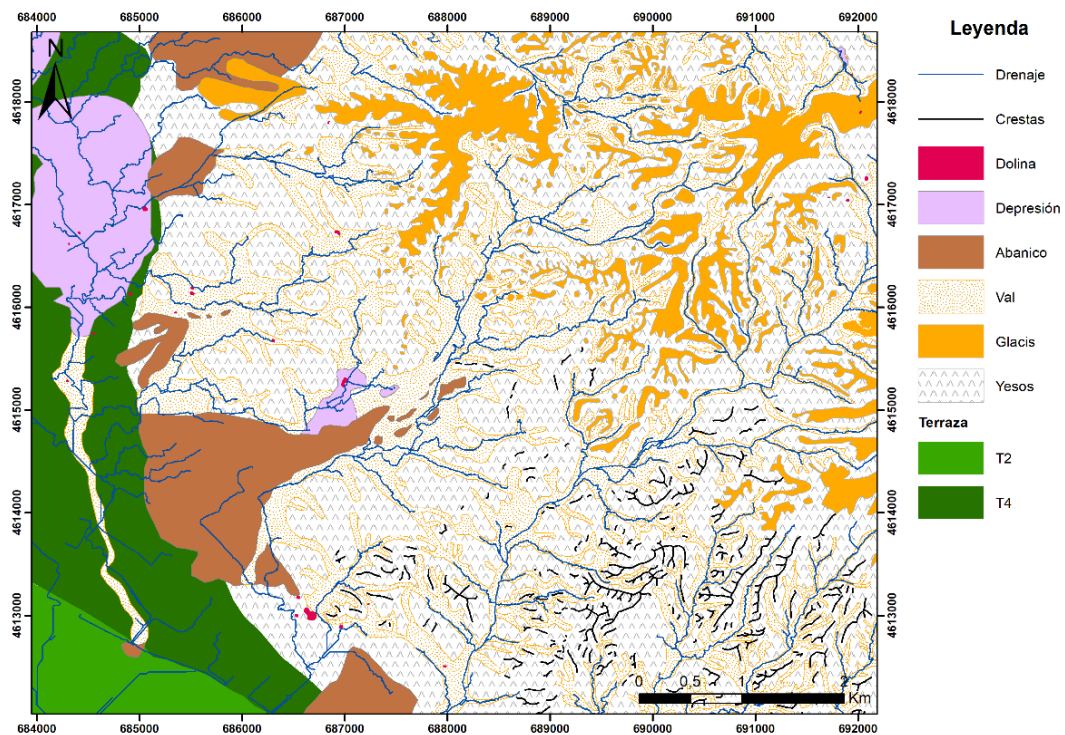


Figura 5. Cartografía geomorfológica de la zona de estudio.

5. Metodología

5.1. Metodología de gabinete

5.1.1. Recapitulación de información bibliográfica

Primeramente, se ha consultado el mapa y memoria de los magnas nº355 (Leciñena) y nº384 (Fuentes de Ebro). También se ha tratado con trabajos realizados principalmente por Benito junto con colaboradores ya que es de los autores que más ha trabajado con esta zona, como su tesis en relación con la geomorfología del río Gállego. En relación con la subsidencia de la zona se ha consultado a autores como G. Desir, F. Gutiérrez y J. Guerrero. Todos la información y datos que se han documentado se explican a lo largo de este trabajo.

5.1.2. ArcGIS

El sistema de información geográfico de ESRI ArcGIS v10.7 se ha utilizado para la realización del mapa geomorfológico, para el análisis de la morfometría de la cuenca, para conocer la dinámica y establecer la tasa de subsidencia de la depresión intermedia y de su dolina. Se han usado las ortofotos PNOA de máxima actualidad, las ortofotos del año 1956-1957, los LIDAR del año 2010 y 2015 y el modelo digital del terreno con una resolución de 5 m obtenidos del centro de descargas del IGN.

En el caso de la depresión intermedia y de la dolina, se ha realizado la reconstrucción de los MDT (modelo digital del terreno) mediante el uso de las Lastools y de los modelos digitales de elevación (MDE) del año 2010 y del 2015. Posteriormente, con la finalidad de establecer si se trata de una zona estable o de una subsidente, se ha llevado a cabo la resta de los dos DEM's obtenidos a partir de los LIDAR del año 2010 y 2015. Establecida la existencia de cambios en la topografía se ha procedido a reclasificar los datos obtenidos de modo que sólo las zonas con variación, los valores negativos, han quedado resaltadas. Los intervalos seleccionados han sido -1,5, -1, -0,75, -0,5, -0,35, -0,25 y -0,15 siendo -1,5 la zona de mayor deformación.

5.2. Metodología de laboratorio

Primeramente, se han tomado un total de seis muestras en el campo sigladas según la zona geomorfológica de la que se han obtenido y del pueblo más cercano, en este caso, Villamayor de Gállego, obteniéndose el siguiente siglado ABV-1, ABV-2, ABV-3, ABV-4, VV-1 y VV-2. Las cuatro primeras se corresponden al abanico aluvial y las dos últimas se corresponden al valle de fondo plano. Posteriormente, se obtuvieron otras tres muestras con el siguiente siglado: VY-ABG-1, VY-DP-2 y VY-DL-3. La figura 6 muestra la situación de las muestras.

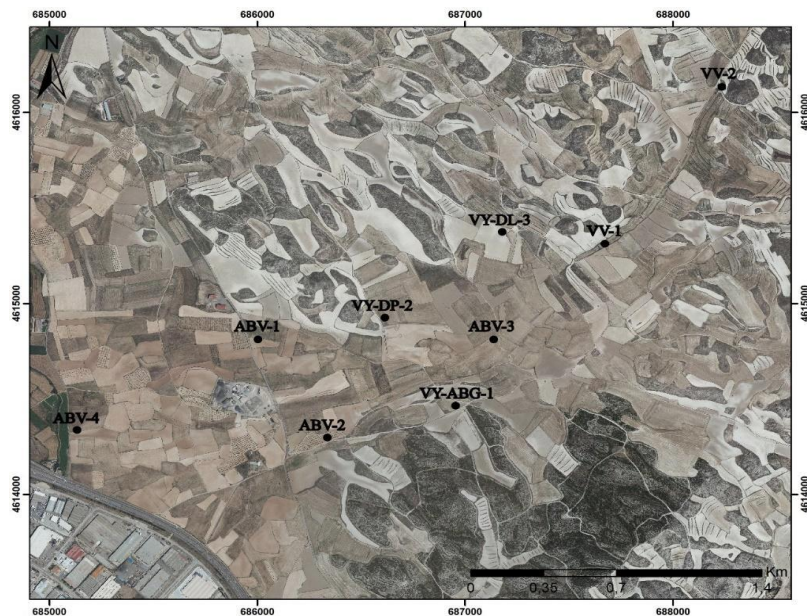


Figura 6. Situación de las muestras en campo.

Previamente a la determinación de las propiedades físico-químicas, se han dejado secar las muestras durante un mes para poder realizar la granulometría por tamizado de varias fracciones mayores a 2 mm y de la fracción menos a 2 mm con la tamizadora CISA BA200N. Las técnicas empleadas para la caracterización composicional y mineralógica de las muestras aparecen sintetizadas en la figura 7.

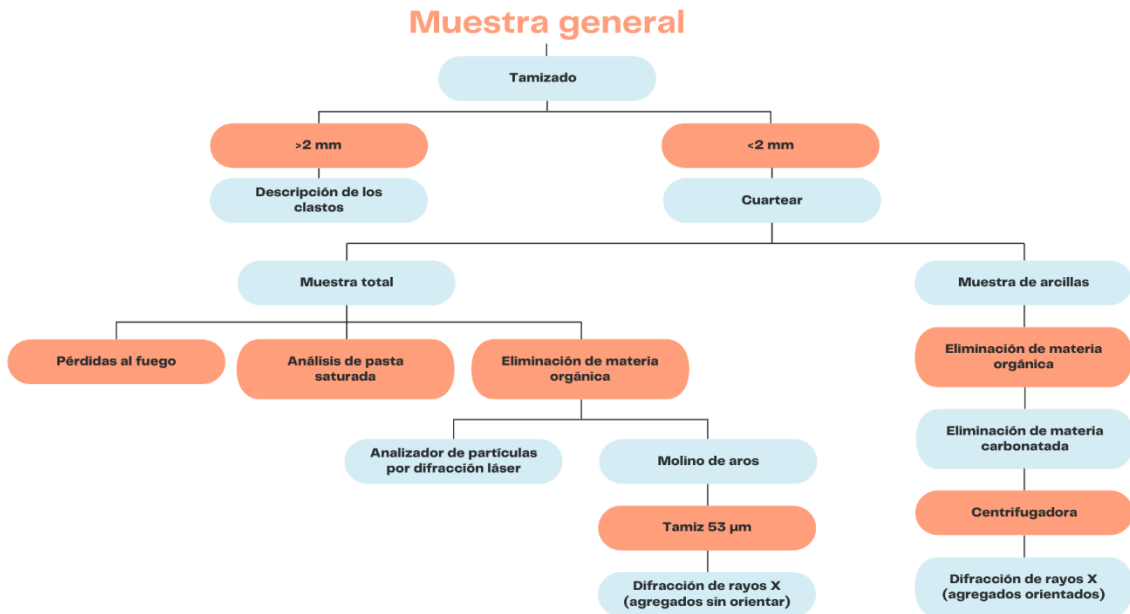


Figura 7. Representación esquemática de la metodología de laboratorio.

5.2.1. Análisis de la fracción mayor a 2 mm

5.2.1.1. Análisis granulométrico de la fracción mayor a 2 mm

El análisis granulométrico de la fracción mayor a 2 mm se ha realizado por tamizado separando las fracciones correspondientes a >31,5 mm, >16 mm, >8 mm, >4 mm y > 2 mm. En la tamizadora CISA BA200N se han colocado los tamices correspondientes y se ha tamizado durante 3 minutos. Posteriormente, se ha depositado la granulometría obtenida de cada tamiz en una bandeja siglada y se ha comprobado si cada fracción presenta agregados. En caso afirmativo, se ha colocado la muestra sobre un papel y se ha pasado el rodillo para separar todos los agregados. Cuando los agregados se han encontrado muy consolidados, se les ha dado con una maza para separarlos y se ha procedido a seguir con el rodillo. Cuando se ha considerado que ya no quedan agregados en ninguna de las fracciones, se ha vuelto a tamizar toda la muestra y se ha pesado cada fracción. A partir de este tamizado, se ha realizado la descripción de cada fracción indicada en el apartado de Resultados.

5.2.2. Análisis de la fracción menor a 2 mm

5.2.2.1. Análisis granulométrico de la fracción menor a 2 mm

Para el análisis granulométrico de la fracción menor a 2 mm, las muestras se han pasado primeramente por el cuarteador para que sean representativas para cada uno de los análisis. Posteriormente, se han realizado pérdidas al fuego para determinar el contenido en carbonato a través del cálculo de la pérdida de peso por ignición (Dean, 1974). Para ello la muestra se ha calentado de manera escalonada a 200, 500 y 900°C que corresponden con la pérdida de agua total, de materia orgánica y de CO₂, respectivamente. La pérdida de CO₂ se interpreta como el contenido en carbonatos.

Para el análisis de la muestra total, se ha eliminado la materia orgánica con un dispersante en metafosfato para poder realizar el análisis con el analizador del tamaño de partículas por difracción láser y el análisis con difracción de rayos X.

El analizador del tamaño de partículas por difracción láser corresponde al modelo Mastersizer 3000 que se encuentra en el Departamento de Ciencias de la Tierra. Se ha usado como parámetro estándar el parámetro SOP sedimento/suelo. Primero el programa ha realizado varios lavados con agua del grifo y otro con agua destilada. Se ha vuelto a llenar con agua destilada. Posteriormente, en el agua destilada, se ha echado la muestra con el dispersante de metafosfato. El analizador ha calculado el tamaño de las partículas seis veces con un oscurecimiento de 14-15%, aproximadamente. Se han obtenido las distintas curvas granulométricas para observar la distribución de los tamaños.

El análisis de difracción de rayos X se ha hecho sobre 1 muestra de 53 μm y se ha pasado por el difractómetro de polvo Philips PW1729 equipado con una rendija automática, monocromador de grafito y radiación $\text{CuK}\alpha$ ubicado del Departamento de Ciencias de la Tierra. A partir del programa X PowderX se han obtenido los difractogramas.

5.2.2.2. Análisis granulométrico de la fracción menor a 0,002 mm

Para el análisis de la muestra de arcillas, se ha eliminado la materia orgánica con un dispersante en metafosfato y se ha eliminado la materia carbonatada con 0,3 N de ácido clorhídrico. Posteriormente, se ha lavado con agua destilada hasta que pH neutro para eliminar el exceso de ácido. La fracción menor de 20 μm se ha extraído por decantación aplicando la ley de Stokes.

Para el análisis de difracción de rayos X se ha realizado agregados orientados donde se ha procedido de la siguiente manera. Primero, se ha colocado la muestra correspondiente en agua destilada y se ha batido durante unos minutos. Posteriormente, se ha añadido la muestra en los botes correspondientes de la centrifugadora Hettich Universal 320 y se ha puesto durante 3 minutos y 36 segundos a 580 rpm. De esta manera, se ha separado la fracción menor a 2 μm , que ha quedado en suspensión. La fracción menor a 2 μm se ha vertido en un bote y se ha puesto a secar con una lámpara de calor para evaporar parte del agua. Por último, con un pincel, se ha colocado la muestra, aún con agua destilada, en un portamuestras de vidrio para poder pasarlo por difracción de rayos X y obtener los difractogramas con el programa X PowderX.

5.2.2.3. Análisis de la composición química

Para conocer la composición química de las muestras, se ha realizado el análisis de pasta saturada del suelo. En ella se ha mezclado una muestra correspondiente a la fracción menor a 2 μm con agua destilada hasta alcanzar la saturación. Realizada la mezcla, se ha dejado reposar durante 24 horas antes de obtener el extracto. Para separar el extracto se ha usado una bomba de vacío y de la disolución que se obtuvo se determinaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, cloruros, sulfatos y cationes.

6. Resultados

El objetivo final que se persigue en este trabajo es conocer cuál ha sido la evolución de la Val de Sies y cuáles han sido los parámetros que la han controlado por lo que se han realizado diferentes tipos de determinaciones y se han aplicado diferentes técnicas ya explicadas en el apartado anterior. Se pueden dividir en dos grupos diferentes, uno basado en las características morfométricas de la zona de estudio implementado mediante ArcGIS y, el otro, basado en el análisis de las muestras tomadas en campo enfocado a conocer y establecer el posible origen común y la evolución conjunto de toda la cuenca mediante la caracterización de los materiales que aparecen en el abanico aluvial, la depresión intermedia y la val.

Se han tomado un total de nueve muestras que corresponden al abanico aluvial, a la val y sus alrededores. Se ha llevado a cabo, en primer lugar, el análisis granulométrico de la fracción mayor a 2 mm por tamizado y de la fracción menor a 2 mm por difracción láser. Posteriormente, se ha realizado el análisis por difracción de rayos X de la composición tanto de la roca total como de los minerales de la arcilla. Y, por último, se ha efectuado el análisis de extracto de pasta saturada.

6.1. Análisis morfométrico de la cuenca

El análisis morfométrico de la cuenca se ha realizado para conocer las características físicas de la cuenca que se recogen en la tabla 1.

Parámetros generales de la cuenca	
Área	6,04 km ²
Perímetro	14,79 km
Ancho	2,50 km
Longitud de la cuenca	5,07 km
Longitud del cauce principal	4,56 km
Longitud total de los cauces	56,09 km
Cota inicial del cauce principal	255 m.s.n.m.
Cota final del cauce principal	420 m.s.n.m.
Desnivel altitudinal	165 m.s.n.m.
Parámetros caracterizadores de la forma de la cuenca	
Factor de forma de una cuenca	0,23
Relación de elongación	0,55
Relación de circularidad	0,35
Índice de compacidad o de Gravelius	1,69
Factor de forma adimensional de Horton	1,19

Tabla 1. Datos morfométricos de la cuenca.

Según Strahler (1952), la curva hipsométrica correspondería a una cuenca madura que tiende a una cuenca vieja (fig 8a). También se han representado las frecuencias altimétricas que indican cual es la altura más frecuente de la cuenca. En este caso corresponde a los 265 m.s.n.m. (fig 8b).

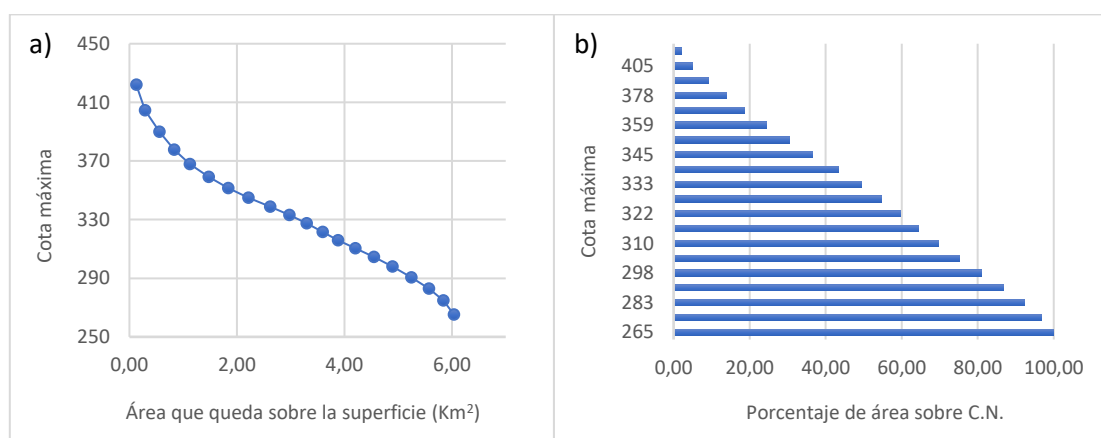


Figura 8. a) Representación de la curva hipsométrica y b) Representación de las frecuencias altimétricas.

Para poder establecer una comparativa con otros abanicos de la zona, se ha obtenido el perfil longitudinal de seis abanicos (fig 9) para ver en que perfil encajan según Milana y Ruzzycki (1999).

En este caso los 6 abanicos corresponden al tipo 1 diferenciándose en la longitud desde el ápice hasta la base.

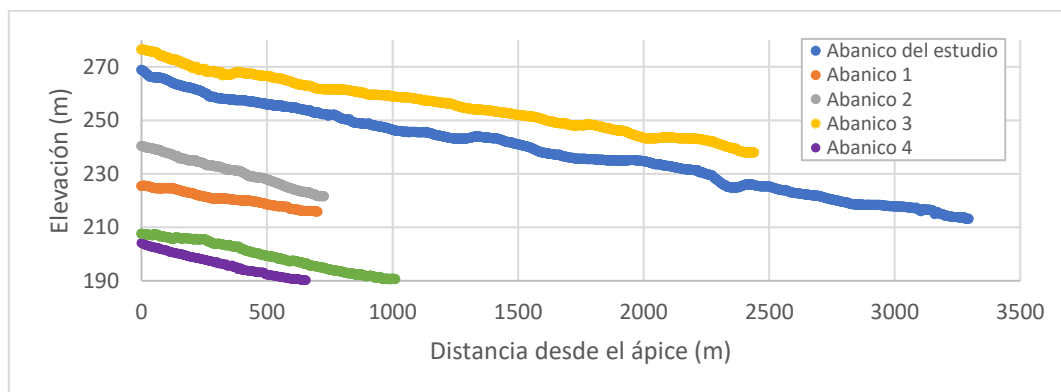


Figura 9. Perfil longitudinal de distintos abanicos.

Además, se ha obtenido distintas áreas de cuencas con sus respectivos abanicos (tabla 2) para ver la relación entre ellas.

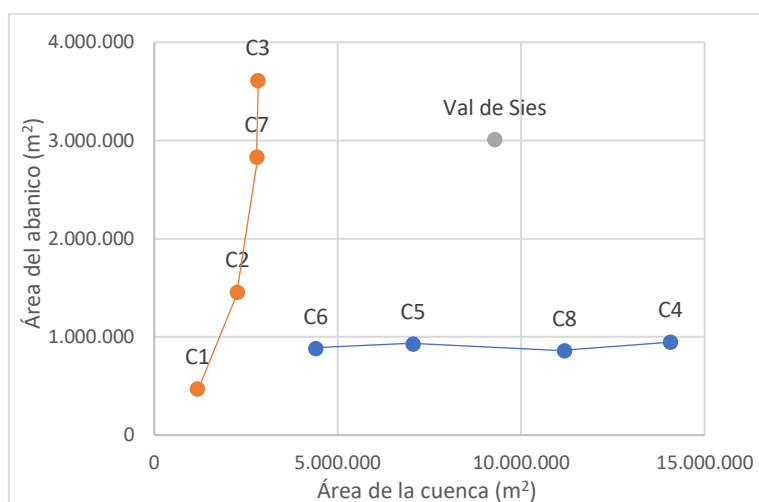


Figura 10. Representación del área del abanico-área de la cuenca.

Cuenca de drenaje	Área de la cuenca (m ²)	Área del abanico (m ²)
Val de Sies	9.282.354	3.008.993
C1	1.180.573	469.916,2
C2	2.269.471	1.452.689
C3	2.825.122	3.610.104
C4	14.069.360	945.496,4
C5	7.054.882	926.581,1
C6	4.405.835	880.654,8
C7	2.799.861	2.828.283
C8	11.182.630	858.014,6

Tabla 2. Datos del área de la cuenca y del área del abanico.

Del análisis de la relación existente entre el área del abanico frente al área de su cuenca de drenaje (fig 10) se observa que existen dos agrupaciones que son coincidentes con la distribución geográfica. Así, los abanicos de las cuencas que acaban en el río Ebro, cuencas C4, C5, C6 y C8, presenta una tendencia clara en el incremento de la cuenca pero los valores del abanico se mantienen constante alrededor de los 1.000.000 m². Sin embargo, en los abanicos de la margen izquierda del río Gállego, la relación es inversa, manteniéndose en este caso el área de la cuenca casi constante e incrementándose la superficie del abanico hacia el N. Lo que destaca de este análisis es que la Val de Sies no sigue ninguno de los patrones anteriores.

6.2. Análisis de la subsidencia en la depresión intermedia

Los procesos de disolución ligados a las litofacies yesíferas han sido documentados tanto en el entorno de Zaragoza como en las zonas de los ríos Ebro y Gállego. Estos procesos aparecen en el registro geológico como dolinas no activas y, además, en la actualidad, se pueden encontrar dolinas activas que están en constante crecimiento con tasas medias muy elevadas, obtenidas mediante nivelación de alta precisión, que oscilan entre 1,0-1,9 cm/año (Desir et al., 2018).

Un ejemplo con tasas elevadas de subsidencia se encuentra en la carretera de Huesca a la altura de Zuera, sobre terrazas inferiores del río Gállego, con tasas entre 7,19 cm/año y 5,44 cm/año (Desir et al., 2018; Guerrero et al., 2021). Por otro lado, aparece un grupo de dolinas activas con tasas de subsidencia de 1,0 cm/año en la Puebla de Alfindén, sobre materiales de la cobertera aluvial. Con todo lo mencionado anteriormente, se ha supuesto que la depresión intermedia y su dolina podrían estar activas.

Para su comprobación, se ha realizado, mediante el programa ArcGIS, la resta de los DEM's obtenidos de los LIDAR del año 2010 y del 2015 para comprobar si existían cambios en la topografía relacionados con los procesos de subsidencia. En la figura 11 se observa que dentro de la depresión intermedia y alrededor de la dolina de sufusión se producen variaciones de hasta 1,97 m en 6 años. Considerando una subsidencia media de 1,5 m durante 6 años, la tasa de subsidencia será de 2,5 cm/año.

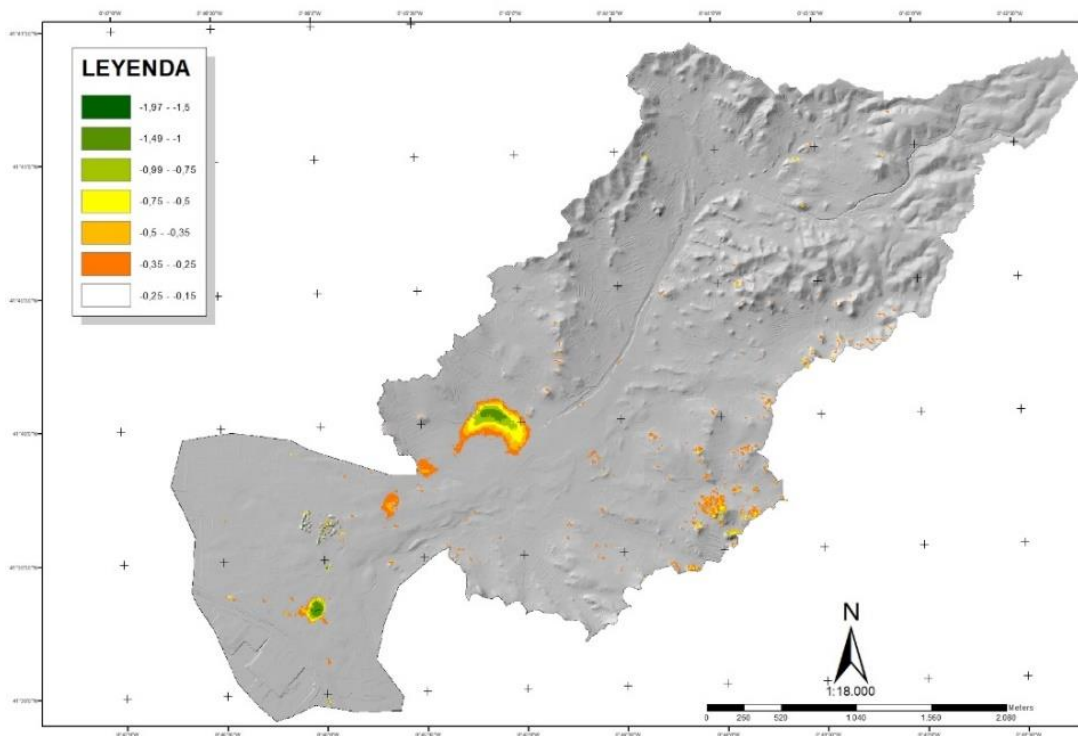


Figura 11. Tasas de subsidencia obtenidas mediante la resta de DEM's obtenidos de los LIDAR 2010 y 2015 mediante ArcGIS con precisión milimétrica.

6.3. Análisis granulométrico por tamizado

Para el análisis granulométrico por tamizado se separó, en cada muestra, la fracción mayor correspondiente a más de 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm y 2 mm. Para la descripción morfológica se ha usado la figura 12 de Powers (1953), donde se relaciona la esfericidad con la redondez. En el anexo 1 y 2 se han incluido los pesos de la muestra total en kilogramos y su porcentaje en peso (sin materia orgánica), respectivamente. Además, se ha incluido en el anexo 3 una tabla donde se describen detalladamente cada una de las fracciones.

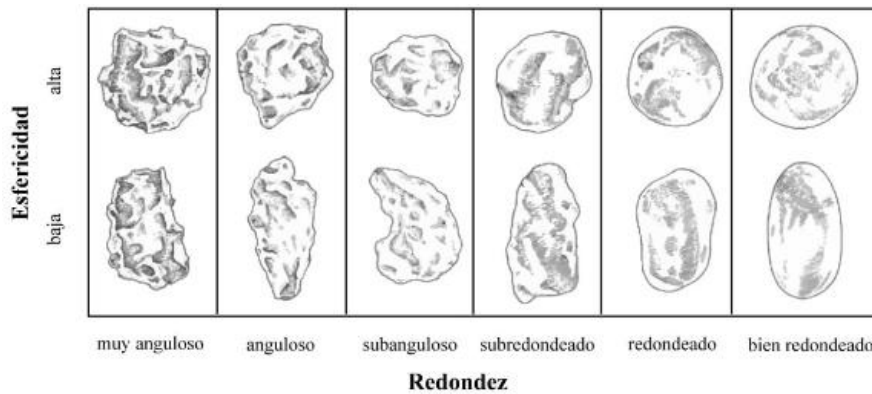


Figura 12. Relación de esfericidad y redondez (tomado de Powers (1953) y modificado de Stow (2006) por Hernández (2017)).

Las muestras VY-ABG-1, VY-DP-2 y VY-DL-3 se obtuvieron posteriormente y se observó una semejanza a las muestras que a continuación se describe.

- Muestra ABV-1

La muestra ABV-1 fue tomada en el extremo norte de la zona central del abanico aluvial (fig 6). Exactamente se sitúa a 41°39'48.11"N y a 0°45'56.06"O y tiene un peso de 4,88 kg. La muestra en el campo presenta una coloración ocre-rojiza y está formada por clastos de caliza, carbonato, cuarzo y sílex con predominio de material fino (arenas y limos). En el análisis granulométrico a detalle se han encontrado cantos de angulosos a redondeados con cavidades, porosidad, cantos impresos y óxidos de hierro.

- Muestra ABV-2

La muestra ABV-2 fue tomada en el extremo sur de la zona central del abanico aluvial (fig 6). Exactamente se sitúa a 41°39'31.29"N y a 0°45'42.31"O y tiene un peso de 5,83 kg. La muestra en el campo presenta una coloración ocre-rojiza y está formada por clastos de caliza, carbonato y cuarzo con predominio de material fino (arenas y limos). También hay clastos de yeso aunque en los análisis de gabinete no hayan aparecido. En el análisis granulométrico a detalle se han encontrado cantos de subangulosos a redondeados con cavidades, porosidad y cantos impresos.

- Muestra ABV-3

La muestra ABV-3 fue tomada en el ápice del abanico aluvial (fig 6). Exactamente se sitúa a 41°39'47.43"N y a 0°45'8.82"O y tiene un peso de 3,95 kg. La muestra en el campo presenta una coloración ocre-rojiza y está formada por clastos de caliza, carbonato, cuarzo y yeso con predominio de material fino (arenas y limos). Los clastos de yeso no aparecen en los análisis de gabinete. En el análisis granulométrico a detalle se han encontrado cantos de angulosos a redondeados con cavidades y porosidad.

- Muestra ABV-4

La muestra ABV-4 fue tomada en la base del abanico aluvial donde también se encuentra la terraza tres del río Ebro (fig 6). Exactamente se sitúa a 41°39'32.10"N y a 0°46'33.90"O y tiene un peso de 3,38 kg. La muestra en el campo presenta una coloración ocre-rojiza y está formada por clastos de caliza, carbonato y cuarzo con predominio de material fino (arenas y limos). En el análisis granulométrico a detalle se han encontrado cantos de subangulosos a subredondeados con cavidades y porosidad.

- Muestra VV-1

La muestra VV-1 fue tomada en el fondo del valle del fondo plano (fig 6). Exactamente se sitúa a 41°40'1.62"N y a 0°44'47.52"O y tiene un peso de 4,35 kg. La muestra en el campo presenta una coloración ocre-grisácea y está formada por clastos de caliza, yeso y sílex con predominio de material fino (arenas y limos yesíferos). En el análisis granulométrico a detalle se han encontrado cantos de angulosos a redondeados con cavidades y cantos impresos.

- Muestra VV-2

La muestra VV-2 fue tomada en el relleno en el fondo del valle del fondo plano (fig 6). Exactamente se sitúa a 41°40'28.64"N y a 0°44'19.06"O y tiene un peso de 2,98 kg. La muestra en el campo presenta una coloración ocre-grisácea y está formada por clastos de caliza y agregados de caliza y yeso con predominio de material fino (arenas y limos). En el análisis granulométrico a detalle se han encontrado cantos de ángulos a subredondeados con cavidades, porosidad y óxidos de hierro.

6.4. Análisis granulométrico por difracción láser

El análisis granulométrico por difracción laser se realizó en todas las muestras excepto en VY-ABG-1, VY-DP-2 y VY-DL-3. Para ello se separó la fracción de fino (<2 mm), se eliminó la materia orgánica con un dispersante en metafosfato y se analizó mediante lo explicado en el apartado de metodología. A continuación, se describen las curvas granulométricas obtenidas que se encuentran en el anexo 4.

- Muestra ABV-1

La muestra ABV-1 tiende a presentar una distribución más homogénea. Los tamaños abarcan desde 0,3 micrómetros hasta 3.000 micrómetros, siendo predominantes los correspondientes al pico de 100 micrómetros.

- Muestra ABV-2

La muestra ABV-2 tiende a presentar una distribución más homogénea. Los tamaños abarcan desde 0,3 micrómetros hasta 1.000 micrómetros, siendo predominantes los correspondientes al pico de 200 micrómetros.

- Muestra ABV-3

La muestra ABV-3 tiende a presentar una distribución más heterogénea. Los tamaños abarcan desde 0,3 micrómetros hasta 800 micrómetros, siendo predominantes los correspondientes al pico de 70 micrómetros, aunque comienzan a destacar partículas de mayor tamaño entre 2 y 10 micrómetros.

- Muestra ABV-4

La muestra ABV-4 tiende a presentar una distribución más heterogénea. Los tamaños abarcan desde 0,3 micrómetros hasta 1.500 micrómetros, siendo predominantes los correspondientes al pico de 90 micrómetros, aunque comienzan a destacar partículas de mayor tamaño entre 1 y 10 micrómetros.

- Muestra VV-1

La muestra VV-1 tiende a presentar una distribución muy heterogénea. Los tamaños abarcan desde 0,3 micrómetros hasta 2.000 micrómetros, siendo predominantes los picos correspondientes a 5 micrómetros y 80 micrómetros.

- Muestra VV-2

La muestra VV-2 tiende a presentar una distribución más homogénea. Los tamaños abarcan desde 0,3 micrómetros hasta 1.000 micrómetros, siendo predominantes los correspondientes al pico de 4-7 micrómetros.

6.5 Análisis por difracción láser

El análisis de las muestras mediante difracción de rayos X se ha realizado con el fin de conocer si existían diferencias composicionales claras entre las muestras analizadas, especialmente entre las que corresponden a los rellenos de la val y los que pertenecen al abanico. Los difractogramas obtenidos se encuentran en el anexo 5 y las tablas a detalle para la obtención de los resultados finales aparecen en el anexo 6.

Muestra	Cal	Qtz	Dol	Fdk	Ill	Gp	Plg	Kln	Sm	Chl
ABV-1	40	39	-	10	4	-	4	1	1	1
ABV-2	38	39	-	9	6	-	5	1	1	1
ABV-3	49	28	-	7	8	-	7	1	-	1
ABV-4	35	44	-	9	6	-	4	1	-	1
VV-1	37	28	6	9	8	5	5	1	-	1
VV-2	46	24	3	5	9	1	8	1	2	1
VY-ABG-1	40	31	-	9	9	-	9	1	-	1
VY-DP-2	24	24	15	10	16	7	-	4	-	-
VY-DL-3 (*)	19	13	20	19	-	11	-	-	-	-

Tabla 3. Proporción de los minerales totales en cada una de las muestras (Cal=calcita, Qtz=cuarzo, Dol=dolomita, Fdk=feldespato potásico, Ill=illita, Gp=yeso, Plg=palygorskita, Kln=caolinita, Sm=esmectita, Chl=clorita) (*No ha podido identificarse el tipo de arcilla).

- Muestra ABV-1

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra ABV-1 se ha observado que está compuesta por calcita, cuarzo, feldespato potásico (microclina) y minerales de la arcilla. En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de clorita, illita, palygorskita, esmectita y caolinita.

- Muestra ABV-2

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra ABV-2 se ha observado que está compuesta por cuarzo, calcita, minerales de la arcilla y feldespato potásico (microclina). En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de illita, palygorskita, esmectita, clorita y caolinita. También presenta el interestratificado de rectorita (illita-esmectita).

- Muestra ABV-3

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra ABV-3 se ha observado que está compuesta por calcita, cuarzo, minerales de la arcilla y feldespato potásico (microclina). En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de clorita, illita, palygorskita y caolinita. También presenta rectorita (interestratificado illita-esmectita).

- Muestra ABV-4

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra ABV-4 se ha observado que está compuesta por calcita, cuarzo, minerales de la arcilla y feldespato potásico (microclina). En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de clorita, illita, palygorskita y caolinita.

- Muestra VV-1

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra VV-1 se ha observado que está compuesta por calcita, cuarzo, minerales de la arcilla, feldespato potásico (microclina), dolomita y yeso. En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de clorita, illita, palygorskita y caolinita.

- Muestra VV-2

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra VV-2 se ha observado que está compuesta por cuarzo, calcita, feldespato potásico (microclina), yeso, dolomita y minerales de la arcilla. En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de caolinita, clorita, esmectita, illita y palygorskita. También aparece el interestratificado de rectorita (illita-esmectita).

- Muestra VY-ABG-1

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra VY-ABG-1 se ha observado que está compuesta por calcita, cuarzo, minerales de la arcilla y feldespato potásico (microclina). En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de caolinita, clorita, illita y palygorskita.

- Muestra VY-DP-2

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra VY-DP-2 se ha observado que está compuesta por calcita, cuarzo, minerales de la arcilla, dolomita, feldespato potásico (microclina) y yeso. En el difractograma obtenido del agregado orientado para la obtención del tipo de arcillas se ha observado la presencia de caolinita e illita.

- Muestra VY-DL-3

A partir del difractograma obtenido de la roca total de la muestra VY-DL-3 se ha observado que está compuesta por dolomita, calcita, feldespato potásico (microclina), minerales de la arcilla, cuarzo y yeso. En este caso, debido a la presencia de otros minerales no arcillosos con un tamaño de grano muy fino en altas proporciones, las arcillas no llegan a verse en los difractogramas.

6.6. Análisis de extracto de pasta saturada

Debido a los porcentajes bajos de yeso obtenidos en difracción de rayos X se realizó un análisis de extracto de pasta saturada para obtener los cationes solubles de las distintas muestras (tabla 4).

Muestra	pH	CE	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	SO ₄ ²⁻ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	Ca ²⁺ (meq/L)	Mg ²⁺ (meq/L)	Na ⁺ (meq/L)
ABV-1	6,81	6,36	1,94	67,90	5,67	70,11	5,32	0,33
ABV-2	7,41	2,96	3,03	30,82	2,65	32,98	1,67	0,26
ABV-3	7,34	3,86	2,91	38,99	5,73	36,33	5,25	1,06
ABV-4	7,53	1,22	5,15	2,35	2,96	5,86	0,77	0,25
VV-1	7,12	3,13	2,12	34,03	2,47	35,73	1,79	0,40
VV-2	7,24	3,50	1,74	38,26	3,72	38,22	4,82	0,19
VY-ABG-1	7,28	3,27	3,37	34,76	2,54	36,78	1,39	1,41
VY-DP-2	7,34	3,15	2,34	35,56	2,31	34,58	4,12	0,24
VY-DL-3	7,82	3,76	3,38	39,36	4,17	36,23	6,69	0,99

Tabla 4. Resultados del análisis del extracto de pasta saturada (CE=conductividad eléctrica).

Los resultados muestran que se trata de suelos con una composición mayoritariamente de sulfatos cálcicos con composiciones muy similares a excepción de la muestra ABV-1 y ABV-4. En el primer caso, la muestra presenta concentraciones que corresponden al doble de la media. Esta fue cogida en un talud situado al margen derecho del abanico por lo que los eventos de evapotranspiración pueden haber dado lugar a un horizonte petrogypico enriquecido en yeso. En el segundo caso, la muestra presenta concentraciones muy bajas en todos los iones. Esto puede ser debido a que se obtuvo de la zona distal del abanico, en contacto con la terraza T4, por lo que se encuentra directamente sobre el aluvial.

7. Discusión

Como se ha indicado anteriormente, el principal objetivo que se persigue es este trabajo es establecer cuál ha sido la evolución de la Val de Sies y qué papel han representado en ello los procesos de erosión hídrica y la subsidencia. Por ello, la caracterización morfométrica y el análisis geomorfológico de la cuenca son fundamentales a la hora de establecer cuál ha sido el peso específico de estos procesos además de establecer su relación con la dinámica fluvial de ambos ríos, Ebro y Gállego.

En primer lugar, y partiendo de los resultados del análisis morfométrico, la zona de estudio se trata de una cuenca de pequeña escala, con un área total de la cuenca de drenaje de 9 km² y un abanico de 3 km² y un desnivel de 165 m.s.n.m. Según Strahler (1952) se trataría de una cuenca madura-vieja y según los factores de forma sería alargada. La cuenca presenta unas características morfométricas singulares que indican una formación no coincidente con las condiciones actuales. Un indicador sería que la cuenca actual no es coincidente con ninguno de los patrones abanico/cuenca obtenidos de las restantes cuencas (fig 10), además de la desconexión del abanico de la actual cuenca. El drenaje actual se ramifica en la zona distal de la cuenca hacia las dos pequeñas vales situadas en ambos márgenes del abanico que están situados topográficamente por debajo de éste, quedando el abanico desconectado del drenaje actual (fig 13).

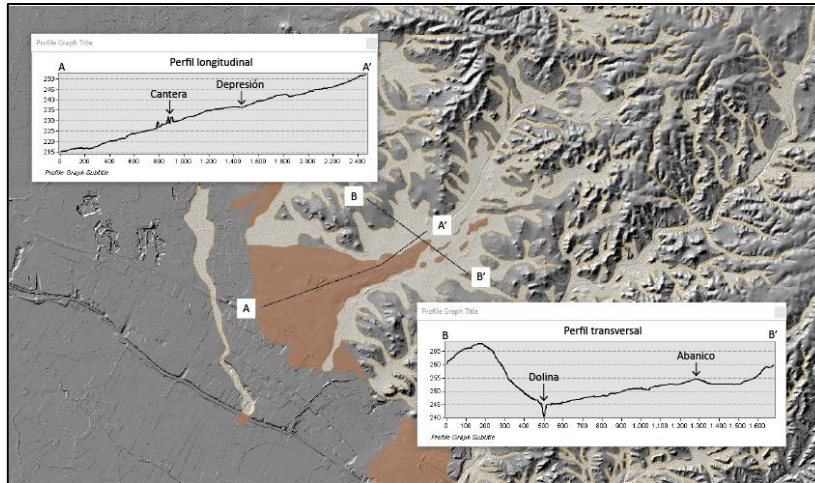


Figura 13. Perfiles topográficos transversales y longitudinales del sector final de la Val de Sies.

Otra de las evidencias con la que se piensa en el cambio de las condiciones de formación hasta la actualidad es, que tanto en la ortofoto como en campo, la coloración de los sedimentos que componen el abanico son muy diferentes a las litofacies yesíferas y a los depósitos de glacia presentes en la cuenca. Estos sugieren, debido a su coloración rojiza, una fuente externa a la cuenca por lo que se pensó en una posible terraza T5 o superior del río Gállego. Por ello, mediante el análisis geomorfológico y la cartografía se intentó establecer e identificar la posible presencia de la terraza en cotas elevadas, próxima a la divisoria, que actuara como área fuente. Sin embargo, después de realizar una salida de campo y gracias a la cartografía se comprobó que los depósitos más antiguos encontrados corresponden a un nivel del Glacis, G5, cuyo origen está en los relieves estructurales de la Sierra de Alcubierre, dado que la composición de su depósito son mayoritariamente calizas y margas.

Para poder establecer la relación entre el abanico y la cuenca de drenaje también se ha realizado la caracterización de los materiales desde el punto de vista mineralógico y físico-químico. El análisis mineralógico por difracción láser muestra como el tamaño de grano va cambiando desde la val hasta la zona distal del abanico en contacto con la terraza T4. En la figura 14 se observa el paso de fracciones de menor a mayor tamaño algo coherente con una sedimentación del material transportado por la val en la zona del abanico como consecuencia de la pérdida de confinamiento. Además, en la muestra ABV-4, en la zona distal del abanico, se observa el aumento de las fracciones menores.

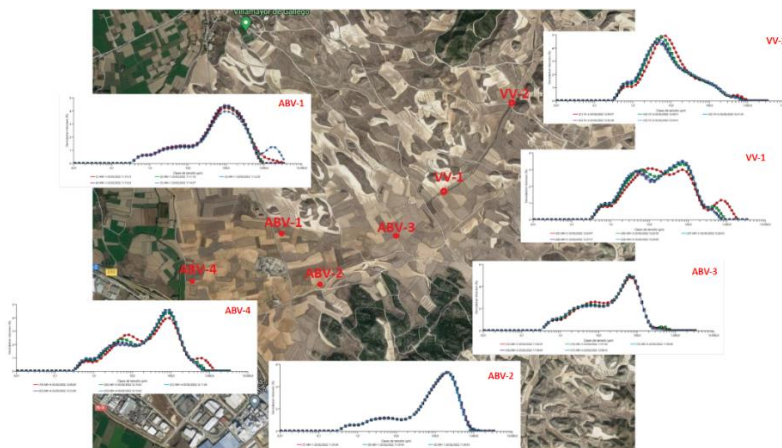


Figura 14. Relación entre la distribución espacial de las muestras y el resultado de difracción láser.

La tonalidad más rojiza del abanico sugiere la presencia de minerales de la arcilla de origen detrítico. Por tanto, se ha realizado el análisis de difracción de rayos X donde se observa, colocando las muestras de manera longitudinal, un aumento del cuarzo y una tendencia a disminuir la cantidad de calcita hacia la zona distal del abanico pero los diferentes tipos de minerales de la arcilla son bastante homogéneos (fig 15). Debido a ello, los resultados de los análisis de difracción de rayos X no arrojan un resultado concluyente que indique una relación entre el abanico y la cuenca.

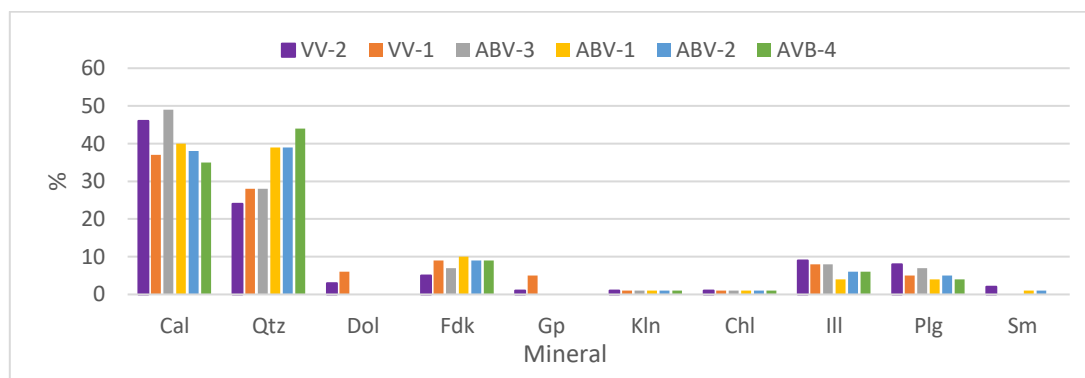


Figura 15. Resultados obtenidos en difracción de rayos X desde la val hasta la zona distal del abanico (Cal=calcita, Qtz=cuarzo, Dol=dolomita, Fdk=feldespato potasico, Gp=yeso, Kln=caolinita, Chl=clorita, Ill=illita, Plg=palygorskita, Sm=esmeclita).

Un hecho remarcable del análisis por difracción de rayos X es que se han obtenido porcentajes muy bajos en yeso (1-11%), algo totalmente anómalo siendo que nos situamos en una zona con litofacies yesíferas. Para comprobar la fiabilidad de los resultados de la difracción se ha realizado un análisis de composición química del material mediante el extracto de pasta saturada y se ha observado una relación inversa, es decir, cuando tenemos bajos porcentajes en los difractogramas tenemos valores mayores en el análisis de extracto de pasta saturada. Consultado la bibliografía de trabajos previos realizados en litofacies yesíferas con las mismas características se ha comprobado que no se trata de un error, sino que es común cuando se comparan los resultados de ambas técnicas. En este sentido, Benito (1989); Herrero (1991); Artieda (1993) o Desir (2001) encuentran resultados semejantes en los análisis de diferentes muestras de la formación Zaragoza. Con relación a esto, Herrero et al. (2009) recopilan varios trabajos donde se citan diferentes problemas que ha dado el yeso en los análisis de difracción de rayos X siendo este un problema no puntal que no se sabe a qué puede ser debido.

De los resultados de la composición química del extracto de pasta saturada podemos señalar que las concentraciones en SO_4^{2-} de casi todas las muestras son bastante constantes, oscilando entre 35-40 meq/l al igual que el Ca^{2+} . Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica (CE) están en todas las muestras por encima de los valores de la saturación en yeso, 2,54 mS/cm lo nos indica que los sulfatos presentes en los suelos son fácilmente disueltos y exportados por las aguas de escorrentía. Parece que la composición química de las muestras no muestra ninguna evidencia de un posible origen y/o evolución diferente entre el abanico y la cuenca. Las muestras señalan un descenso en el contenido de yeso hacia la zona distal de la cuenca, con un ligero incremento en el interior de la depresión y hacia la zona de la dolina que puede indicar una zona preferente de circulación de la escorrentía y del flujo subsuperficial hacia esa zona. Este hecho es coherente con la actividad de los procesos de subsidencia, evidenciados por la resta de lidars,

y que señalan hacia un hundimiento y desplazamiento hacia el NW del depocentro de la depresión.

Con todo ello, desde el punto de vista de la composición mineralógica y de las propiedades físico-químicas, no se puede establecer de forma clara cuál es el área fuente de los materiales que componen el abanico aluvial de la Val de Sies. Sin embargo, debido a que la composición entre el abanico y la val se aproxima y aunque actualmente ambos se encuentran desconectados, parece ser que existió una interacción entre ambos. Por tanto, se puede establecer un origen mixto del abanico proveniente de la Val de Sies y de la cuenca contigua.

Entonces parece claro que tanto la cuenca como el abanico funcionaron como una sola unidad hasta que se produjo la incisión de la red de drenaje quedando el abanico descolgado del drenaje principal. Dado que el abanico enlaza en su parte distal con la terraza T4 parece claro que el máximo de subsidencia registrado en el momento de sedimentación de esta terraza puede haber condicionado el desarrollo de la depresión intermedia ya que la dolina que actúa como sumidero estaría conectada con el drenaje subsuperficial y la zona de descarga en el río Gállego.

Para establecer cuál es el momento en que se produce esa separación y ver cuál ha sido la evolución posterior es necesario analizar el papel de los procesos de subsidencia y la evolución de la depresión intermedia. Como se ha mencionado anteriormente, la depresión intermedia y su dolina han presentado variaciones topográficas de hasta 1,97 cm en 6 años con tasas de subsidencia de 2,25 cm/año. Para comprobar los resultados, se ha realizado una comparativa con los datos de interferometría de radar realizada por la agencia europea del medio ambiente mediante imágenes de satélite Copernicus (fig 16). Los datos son suministrados por "European Ground Motion Service" o Servicio Europeo de Movimiento Terrestre (EGMS).

En la figura 16 se observa que las tasas de subsidencia de la depresión intermedia oscilan entre 15,50 mm/año en el punto de máxima deformación y 4,50 mm/año en los márgenes, siendo el área subsidente muy similar a la obtenida por ArcGIS. Pero las tasas obtenidas a través de este método son mínimas y llegan a ser hasta 7 veces menores a las obtenidas mediante la resta de los DEM's obtenidos de los LIDAR debido a que el dato se obtiene del valor medio de un píxel de 90x90, no como en los LIDAR que se ha trabajado con una resolución de 1 m (Guerrero et al., 2021).



Figura 16. Datos de las tasas de subsidencia obtenidos de la EGMS mediante el análisis interferométrico multitemporal de imágenes de radar Sentinel-1 a máxima resolución con precisión milimétrica. El punto marcado con un círculo morado es la dolina de sufusión.

De estos resultados también se desprende que la subsidencia se está acentuado hacia el NW por lo que parece que se está desplazando hacia el río Gállego dejando desconectado el drenaje hacia el Ebro y, por tanto, el abanico del resto de la cuenca. Marqués (2018) señala en su estudio que el río Gállego, en su tramo inferior, ha sufrido desde 1927 una incisión de aproximadamente 10 m con una tasa de incisión más o menos constante de 2,54 cm/año. Esta tasa es muy semejante a los datos obtenidos en la depresión mediante la resta de Lidars. También, Peña et al. (2020) señala que esta incisión solo afecta al tramo inferior ya que no se ha detectado más arriba del azud de Urdán en Villanueva de Gállego. Esto se relaciona con la acción antrópica (Martín Vide et al., 2010) pero sobre todo con los procesos de subsidencia (Benito et al., 1998; 2000). Estos procesos son reconocibles por las paleodolinas que aparecen sobre el cauce y en la llanura de inundación y que indican una actividad reciente de los procesos de karstificación.

En el estudio hidrológico del MAGNA (Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C., 1998) se indica que el aluvial cuaternario del río Gállego se trata de un acuífero que es recargado, según la "Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Ebro" realizada en 1982, en un 90% por el riego y un 10% a través de la infiltración del agua de lluvia y de aportes del propio río. Además, las líneas de isopiezas son paralelas al cauce actual. También, en la figura 17, se observa un alineamiento de las dolinas cartografiadas en el MAGNA que es coherente con la dirección dominante del diaclasado.

Por tanto, se concluye, que se podría estar produciendo una captura mixta superficial/subsuperficial del drenaje de la cuenca de la Val de Sies en dirección al río Gállego en vez de seguir el drenaje superficial hacia el río Ebro que sería coherente con la topografía y la pendiente de la cuenca.

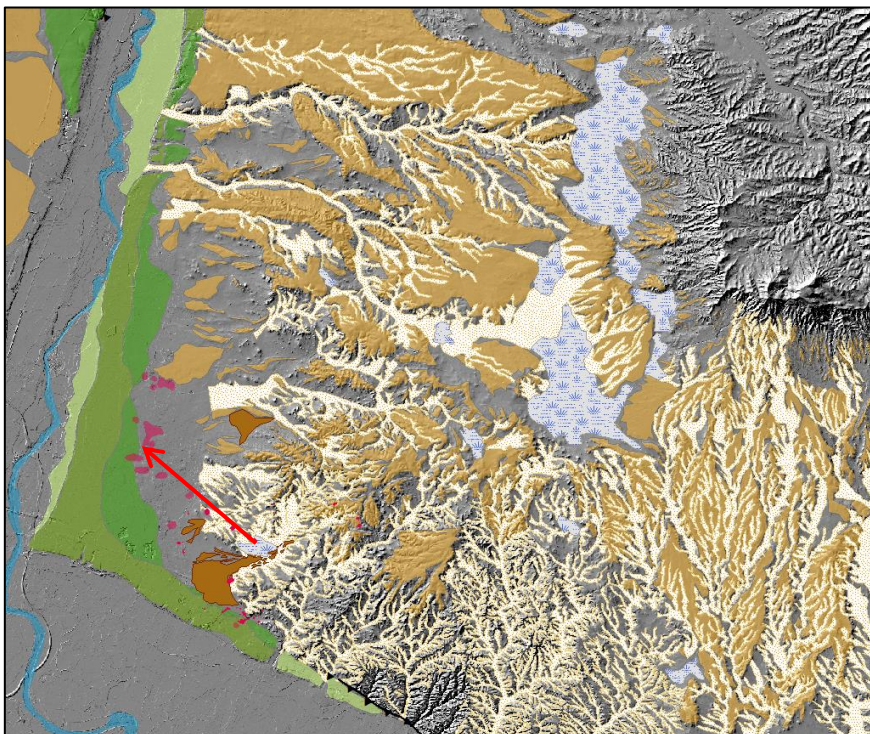


Figura 17. Cartografía geomorfológica donde se observa la dirección predominante (línea roja) de la dolinas (realizado por Gloria Desir).

8. Conclusión

Como se ha mencionado anteriormente, la zona de estudio presenta una cuenca de drenaje madura-vieja (Strahler, 1952) de 9 km² junto con un abanico que se encuentra desconectado actualmente de ella y la cual presenta una relación abanico/cuenca muy diferente en comparación a otras cuencas situadas alrededor. Además, desde el punto de vista mineralógico y físico-químico, el origen del abanico no se puede esclarecer con exactitud pero debido a la proximidad de la composición entre el abanico y la val podría ser un origen mixto junto con la cuenca contigua.

Según los resultados obtenidos, la cuenca de drenaje y el abanico actuaron como una sola unidad hasta que se produjo la incisión de la red de drenaje. Esta incisión se ha relacionado con los procesos de subsidencia. La depresión intermedia y su dolina de suforesión han presentado tasas de subsidencia de 2,25 cm/año, además de que ésta se acentúa hacia el NW desplazándose hacia el río Gállego. Esto ha provocado que el drenaje de la cuenca quede desconectado hacia el río Ebro, que sería lo más coherente según la topografía y la pendiente de la cuenca. El proceso de subsidencia es el que generaría la incisión de la red de drenaje provocando que el abanico quede separado de la val y se generaría una captura superficial/subsuperficial hacia el río Gállego en vez de hacia el río Ebro.

9. Bibliografía

Artieda, O. (1993): *Factores geológicos que inciden en el desarrollo de los suelos en un medio semiárido. El caso de Quinto (Zaragoza)*. Universidad de Zaragoza, 305 p y anexos.

Benito, G. (1987): Karstificación y colapsos kársticos en los yesos del sector central de la depresión del Ebro (Aragón, España). *Cuaternario y Geomorfología*, 1: 61-76.

Benito, G. (1989): *Geomorfología de la cuenca baja del río Gállego*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 764 p (inédita).

Benito, G., Gutiérrez, F., Pérez-González, A. y Machado, M.J. (2000): Geomorphological and sedimentological features in Quaternary fluvial systems affected by solution-induced subsidence (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology*, 33: 209-224.

Benito, G., Pérez-González, A., Gutiérrez, F. y Machado, M.J. (1998). River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gállego River, Ebro basin, Spain). *Geomorphology*, 22: 243-263.

Cuadrat, J. M., Saz, M. A., Serrano, R., y Tejedor, E. (2014): El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global. *Zaragoza: Universidad de Zaragoza*.

Dean, W.E. (1974): Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44: 242-248.

Desir, G. (2001): *Erosión hídrica de terrenos yesíferos en el sector central de la Depresión del Ebro*. Publicaciones Consejo Superior de Protección de la Naturaleza. Serie Investigación, 15, 326 p.

- Desir, G., Gutierrez, F., Merino, J., Carbonel, D., Benito-Calvo, A. y Gerrero, J. (2018): Rapid subsidence in damaging sinkholes: Measurement by high-precision leveling and the role of salt dissolution. *Geomorphology*, 303: 393-409.
- Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C. (1998): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 355 (Leciñena) y memoria*. IGME, Madrid. 47 p.
- Guerrero, J., Sevil, J., Desir, G., Gutiérrez, F., Arnay, Á.G., Galve, J.P. y Reyes-Carmona, C (2021): The Detection of Active Sinkholes by Airborne Differential LiDAR DEMs and InSAR Cloud Computing Tools. *Remote Sens*, 13: 3261.
- Gutiérrez, F., Guerrero, J. y Lucha, P. (2008): A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology*, 53 (5): 993-1006.
- Hernández, U.Z. (2017): *Manual de prácticas de laboratorio de Petrología Sedimentaria*. Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México: 106 p y anexos.
- Herrero, J. (1991): *Morfología y génesis de suelos sobre yesos*. Monografías INIA, 77, 447 p.
- Herrero, J., Artieda, O y Hudnall, W.H. (2009): Gypsum, a tricky material. *Soil Science Society American Journal*, 73: 1757-1763.
- Marqués, L.A. (2018): *Alteraciones hidrogeomorfológicas en el Bajo Gállego a partir del registro instrumental*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza: 274 p (inédita).
- Marqués Calvo, L.A., Santos García, J.A., Esnaola Gómez, J.M. y Gil Marín, C. (1991): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 384 (Fuentes de Ebro) y memoria*. IGME, Madrid, 42 p.
- Martín-Vide, J.P., Ferrer-Boix, C. y Ollero, A. (2010): Incision due to gravel mining: Modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117: 261-271.
- Milana, J.P. y Ruzzycki, L. (1999): Alluvial-fan slope as a function of sediment transport efficiency. *Journal of Sedimentary Research*, 69 (3): 553-562.
- Peña-Monné, J.L., Longares Aladrén, L.A., Rubio Fernández, V., Sampietro-Vattuone, M.M. y Sánchez-Fabre, M. (2020): Dynamic Changes in the lower Gállego river (Ebro basin, NE Spain) and their relationship with anthropic activities and the quaternary substrate. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46 (2): 371-393.
- Powers, M.C. (1953): A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23 (2): 117-119.
- Quirantes, J. (1978): Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- Stow, D.A.V. (2006): *Sedimentary Rocks in the Field: A Color Guide*. Academic Press, 320 p.
- Strahler, A. (1952): Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63: 1117-1142.