



**Universidad**  
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

# LA FALLA DEL RÍO GRÍO: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y NEOTECTÓNICA



Autora

**Tania Montserrat Merchán Rivera**

Directores

**Antonio Casas Sainz y José Luis Simón Gómez**

Facultad de Ciencias / Departamento de Ciencias de la Tierra (Universidad de Zaragoza)

Curso 2018-2019

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguán <http://zaguan.unizar.es>



## ÍNDICE

<i>Abstract</i> .....	1
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2. Planteamiento y objetivos</b> .....	<b>3</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>3</b>
<b>3. SITUACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO Y NEOTECTÓNICO</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1 Contexto geográfico y geológico</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2. Evolución neotectónica de deformaciones neógeno- cuaternarias en el centro de Iberia</b>	<b>5</b>
<b>3.3. Estratigrafía</b> .....	<b>6</b>
3.3.1. Paleozoico.....	6
3.3.2. Mesozoico.....	6
3.3.3. Cenozoico.....	7
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>9</b>
<b>4.1 Estructura general</b> .....	<b>9</b>
<b>4.2 Análisis de estructuras a escala de afloramiento</b> .....	<b>12</b>
4.2.1 Afloramientos con estructuras deformacionales.....	12
4.2.2 Otros.....	16
4.2.3 Afloramientos con indicios de deformación tectónica no concluyente.....	17
<b>5. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIONES</b> .....	<b>19</b>
<b>5.1 Interpretación de las estructuras</b> .....	<b>19</b>
5.1.1 Estructuras kársticas.....	19
5.1.2 Estructuras tectónicas.....	20
5.1.3 Fracturas.....	20
5.1.4 Afloramiento con indicios de deformación tectónica no concluyente.....	20
<b>5.2. Interpretación a mayor escala</b> .....	<b>21</b>
<b>5.3. Recomendaciones futuras</b> .....	<b>21</b>
<b>6. CONCLUSIONS</b> .....	<b>22</b>
<b>7. AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>22</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>22</b>
<b>9. ANEXOS</b> .....	<b>23</b>

## **Abstract**

*The characterization of neotectonic faults in the context of the Iberian Chain is important to evaluate the seismic hazard of the area. This study focuses on the characterization of the Río Grió fault as an active fault, because this is one of the main seismogenic faults of the Iberian Chain. The study area is located near the Mularroya reservoir. It is important to characterize the indicators of recent movement of the Río Grió fault in order to characterize the risk of a seismic event, that can be eventually produced by the filling of the reservoir (triggered seismicity). The methodology used consists of a bibliographic study, field work and laboratory work. The study area has been analyzed by aerial photography. Geomorphologic-tectonic mapping has been carried out using morphological criteria. This mapping has been complemented with data obtained in the field. The geomorphological criteria used consist of the observation of lineaments (possible fault traces), produced by the contact between Quaternary and older materials, or by the existence of a conditioned drainage. In total seven outcrops have been studied. Four of them provide useful information for the characterization of the faults in the area. The other three outcrops could not be used for the characterization of the fault, because they result from karst deformation or other processes that could not be interpreted. On a large scale, the multiple traces of the Grió River fault have a main NNW-SSE direction, and the presence of some minor E-W faults is observed. The NNW-SSE faults form a system of horst and grabens. The conclusions of this work are the following: 1) The mapped Río Grió Fault presents NNW-SSE direction segments. They have up to 10 km of length and there is a large area affected by the fault, at least with 5 km within the studied; 2) The faults of the Río Grió Fault Zone have been reactivated during the Late Pliocene-Quaternary using the "old" trace of the Río Grió fault, due to their being areas of weakness; 3) With the criteria obtained, it can be considered that this fault has been active during the Pliocene and Quaternary, under a regime of radial extension. Besides, It is possible that the fault can be reactivated by anthropogenic effects. This work provides new information on the Plio-Quaternary tectonics of the Río Grió fault in the Aragonese Branch of the Iberian Chain.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de las fallas neotectónicas en el contexto de la Cordillera Ibérica resulta importante para evaluar la peligrosidad sísmica de la zona. Este trabajo se centra en la caracterización de la falla del Río Grío como falla activa, ya que ésta es una de las principales fallas sismogénicas de la Cordillera Ibérica. Debido a que la zona de estudio se encuentra en las cercanías del embalse de Mularroya y abarca parte de su vaso, resulta importante la caracterización de la falla del Río Grío, ya que, como comentan Casas *et al.*, (2017), el llenado del embalse puede generar sismicidad inducida en algún segmento activo de la Falla del Río Grío (por la presencia de estas fallas y de materiales permeables del vaso). Esto genera un riesgo de inundación para las poblaciones situadas aguas abajo. Por tanto, el estudio de los indicadores de movimiento reciente es de gran importancia para poder caracterizar adecuadamente dicho riesgo.

### 1.1. Antecedentes

La existencia de la falla del Río Grío no se había reconocido hasta tiempos recientes, aunque autores más antiguos citan ya fallas con orientación similar, con una cierta confusión entre la falla de Río Grío y el cabalgamiento de Datos (ver revisión bibliográfica en Casas *et al.*, 2016).

Se trata de una falla con diversas interpretaciones. Por ejemplo, Vílchez (1986) explica que la falla del Río Grío se generó como un desgarre secundario asociado a una falla de escala de placa (la falla de Datos) durante una fase de deformación tardivarisca.

En tiempos más recientes y desde el punto de vista de la Geología Estructural, Marcén y Román (2015) y Marcén (2014) estudian en detalle la cinemática durante el Cenozoico de la falla del Río Grío en la zona de Codos y Tobed, al sur de nuestra zona de estudio, delimitando la Zona de Falla del Río Grío y caracterizando su movimiento. Según estos autores, la falla del Río Grío es uno de los principales accidentes que segmentan la Cordillera Ibérica, se extiende longitudinalmente a lo largo de al menos 20 km, con una dirección NNW-SSE y presenta una zona de falla con rocas asociadas (brechas y harinas de falla) con un espesor de decenas de metros. En su trabajo, concluyen que la Falla del Río Grío es una fractura tardivarisca (al igual que indica Vílchez, 1986) de alto buzamiento, con posible actividad durante el primer ciclo alpino extensional y reactivada con componente dextral bajo régimen transpresivo durante la compresión cenozoica, bajo direcciones de compresión variables desde ENE hasta NNW.

También recientemente, algunos autores (Gutiérrez *et al.*, 2012 y Gutiérrez *et al.*, 2013) han realizado una cartografía geomorfológica, y han interpretado que la depresión del Río Grío podría corresponder con un graben neotectónico de edad Plioceno superior-Cuaternario, relleno por depósitos de abanicos aluviales y disecado posteriormente por el Río Grío y sus afluentes. Además, según Gutiérrez *et al.*, (2013), la longitud de alguna de las fallas normales indica que tienen potencial para generar terremotos con una magnitud momento del orden de 6,8.

## 1.2. Planteamiento y objetivos

Actualmente, el interior de la placa Ibérica se considera una zona con sismicidad poco significativa; sin embargo, presenta evidencias de actividad tectónica reciente (Gutiérrez *et al.*, 2013; Simón *et al.*, 2012). Es importante estudiar y caracterizar estas fallas para evaluar adecuadamente la peligrosidad sísmica de esta región. Esta valoración debe ser tomada en cuenta en aspectos como la edificación, especialmente en la implantación de instalaciones estratégicas o peligrosas (Lafuente, 2011) como es el caso del embalse de Mularroya.

Como se ha comentado, el embalse de Mularroya es un embalse en avanzado estado de construcción que, como indican Casas *et al.*, (2017), por su situación geológica se prevé que presentará numerosos problemas, tanto en relación con los materiales donde se va a situar el vaso y el túnel de trasvase de agua del río Jalón a la presa, como por la posible generación de una sismicidad inducida tras el llenado del vaso (a favor de segmentos de la falla del Río Grío).

El objetivo general de este trabajo es por tanto, valorar la posible actividad reciente de la falla del Río Grío. Este objetivo se concreta en: (1) cartografiar la traza de falla del Río Grío a partir de criterios estructurales y geomorfológicos, y (2) caracterizar la falla y los criterios que evidencien su actividad durante el Cuaternario, y por tanto valorar si puede considerarse una falla activa.

## 2. METODOLOGÍA

La realización de este trabajo ha incluido un estudio bibliográfico inicial, trabajo de campo y trabajo de gabinete. A continuación, se explica brevemente cada apartado, teniendo en cuenta que el trabajo de campo y la elaboración de las cartografías se han realizado de forma continua y complementaria a lo largo de la elaboración de este trabajo.

### a) Estudio bibliográfico

Se ha realizado una búsqueda y un estudio bibliográfico de documentos relacionados con el área de estudio y principalmente con la falla del Río Grío.

### b) Trabajo de campo

Tras una observación general de la zona, se han seleccionado los lugares de mayor interés para ser estudiados en campo. Estos lugares se han elegido teniendo en cuenta diferentes criterios.

Por una parte, mediante fotografía aérea y criterios morfológicos, se han seleccionado los lugares donde se observan contactos rectilíneos entre materiales paleógenos, mesozoicos y paleozoicos y materiales de posible edad cuaternaria (lo cual se verifica en campo). También se han buscado anomalías rectilíneas en el relieve sobre materiales cuaternarios, como alineaciones por drenaje condicionado. Todo ello con el fin de estudiar posibles segmentos de la falla del Río Grío.

Por otra parte, se han estudiado taludes de carretera en los que afloran materiales cuaternarios, por su accesibilidad y por la limpieza y calidad de exposición. Algunos de estos taludes se sitúan en las nuevas carreteras variantes de la autonómica A-2302 y la N-IIa, que serán afectadas por el llenado del embalse de Mularroya.

En cada afloramiento, se describen y se toman medidas de los elementos relevantes cuando los materiales lo permitan, como la orientación de la estratificación y de planos de falla. Finalmente se realizan fotografías de las zonas de mayor interés.

### c) Trabajo de gabinete

Se han analizado fotografías aéreas e imágenes de satélite (mediante visores como *Google Maps*, *Google Earth* e *Iberpix*) y, con ellas y con los datos de campo, se ha elaborado la cartografía geomorfoestructural. Para la digitalización de la cartografía y la observación a detalle, se ha utilizado el sistema de información geográfica *Arcgis 10.3*. Esta cartografía geomorfoestructural se ha realizado mediante observaciones propias y revisando trabajos previos, como las cartografías realizadas por Gutiérrez *et al.*, (2012) y por Hernández Samaniego *et al.*, (1980) (cartografía del MAGNA del IGME).

En algunos de los afloramientos se han elaborado mosaicos fotográficos panorámicos y, sobre ellos, cortes de detalle. Con todos los datos y la información bibliográfica, se ha procedido realizar las interpretaciones y redactar las conclusiones del trabajo.

## 3. SITUACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO Y NEOTECTÓNICO

### 3.1 Contexto geográfico y geológico.

La zona de estudio se encuentra en comunidad autónoma de Aragón. Desde Zaragoza se accede a la zona por la Autopista del Nordeste o A-2. Se trata de una zona montañosa que comprende al sur parte de la Sierra de Vicor y de la Sierra de Algairén y al noroeste parte de la Sierra de la Virgen (fig.1). En estas sierras se alcanzan las cotas más altas con 1427 m.s.n.m en la Sierra de Vicor.

Atravesando la zona con dirección principal NW-SE se encuentra el río Grío y al norte, con dirección principal SO-NE, el río Jalón. El río Grío es uno de los afluentes del río Jalón, que es a su vez afluente del río Ebro por su margen derecha. En los valles de estos ríos se encuentran las cotas más bajas de la zona, con 440 m.s.n.m. en el valle del río Grío y de hasta 380 m.s.n.m en el valle del Jalón.

Desde un punto de vista geológico, se encuentra en el borde norte de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, que se encuentra limitado al sur por la cuenca cenozoica de Calatayud (con orientación NO-SE) y al norte por la Cuenca del Ebro. La Cordillera Ibérica es un orógeno alpino intracratónico con estructuras de gran complejidad, resultado de su evolución a lo largo de diferentes etapas tectónicas: compresión varisca, fracturación tardivarisca, extensión y mineralizaciones durante el Triásico, extensión y sedimentación durante el Jurásico, y finalmente, compresión en el Cenozoico y algunos movimientos recientes (Cortés y Casas, 1996; Gutiérrez *et al.*, 2012; Calvín Ballester y Casas, 2015; Marcén, 2015; Marcén y Román, 2015; Casas *et al.*, 2017).

Durante el ciclo alpino, esta cordillera constituyó la zona más importante de concentración de la deformación en el interior de la placa Ibérica, en la que fueron muy importantes las fracturas tardivariscas. Durante el Mesozoico la Cordillera Ibérica sufrió una importante extensión, ligada a la apertura del Atlántico Norte y también del Thetys por el Este (Casas *et al.*, 1995). A partir del final del Cretácico, se produce un cambio en el campo de esfuerzos en el Interior de la placa Ibérica, que sufre colisión y subducción continental, primero en su margen norte y luego en su margen sur. De esta forma, se generan estructuras compresionales y la inversión de las cuencas mesozoicas en el interior de la placa (Casas *et al.*, 1995; Casas y Faccenna, 2001).

Como se ha comentado anteriormente, la falla del río Grío es uno de los principales accidentes que segmentan la Cordillera Ibérica. Se trata de una fractura tardivarisca con posible actividad durante el primer ciclo alpino extensional y reactivada durante la compresión cenozoica con componente dextral bajo régimen transpresivo, con direcciones de compresión variables desde ENE hasta NNW. Cerca de esta falla se encuentra con dirección NW-SE el cabalgamiento de Datos, la principal estructura Varisca

de este sector de la Cordillera Ibérica, que presenta una actividad independiente a la falla del Río Grío y puede incluso encontrarse seccionada por ésta (Marcén y Román , 2015).

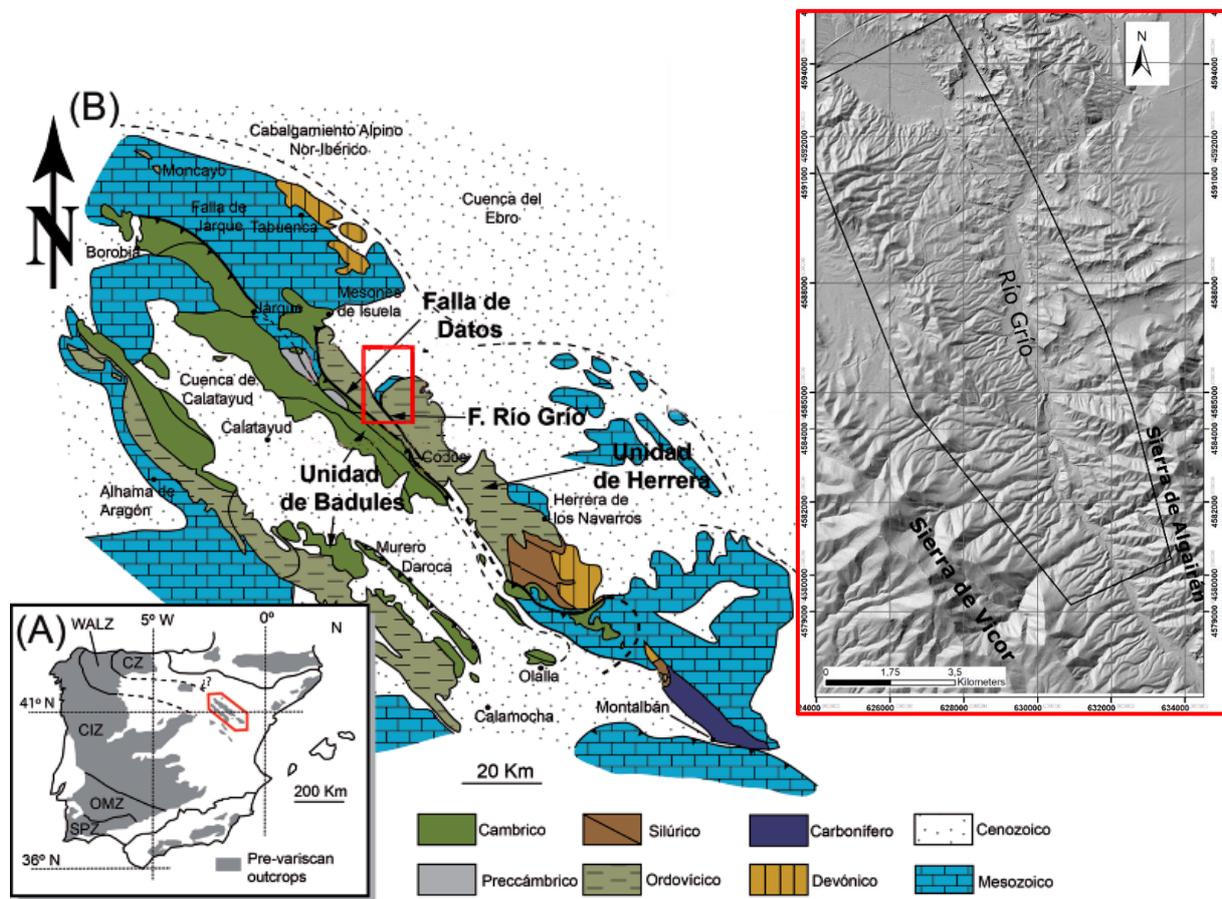


Figura 1. Contexto geográfico y geológico de la zona de estudio. A) Localización de la Cadena Ibérica en el contexto del Macizo Hespérico. B) Mapa geológico simplificado de la Rama Aragonesa. En el recuadro rojo se sitúa la zona de estudio de este trabajo. En la esquina superior derecha, se delimita la zona de estudio en traza negra sobre el modelo digital del relieve (obtenido de ArcMap). Tomado de Marcén y Román (2015) de Calvín-Ballester y Casas (2014).

### 3.2. Evolución neotectónica y deformaciones neógeno- cuaternarias en el centro de Iberia

Como consecuencia del rifting que abrió el surco de Valencia, se produjo una extensión generalizada en todo el este peninsular durante el Neógeno y Cuaternario. La extensión es máxima en la parte central del Surco de Valencia y la deformación extensional se propaga hacia el interior de la Península, afectando notablemente al sector más oriental de la Cordillera Ibérica y generando las cuencas neógeno-cuaternarias que aparecen actualmente en ella: Calatayud, Teruel, Jiloca (Fig.2), Sarrión y Maestrazgo Oriental. (Roca y Guimerà, 1992).

Este proceso extensional presentó tres etapas diferenciadas (Simón, 1982, 1983). En la primera fase de rift (Mioceno inferior) se formó el sistema de fosas del Maestrazgo Oriental. La segunda etapa de rift tiene lugar en el Mioceno superior y en ella se forman la cuenca de Teruel. La tercera etapa se produce en el Plioceno superior-Cuaternario y en ella se produce el hundimiento generalizado del graben del Jiloca (Simón 1989), lo que supone una notable propagación de la extensión hacia el interior de la Cordillera Ibérica. En esta tercera etapa se produce una extensión radial o multidireccional (Simón, 1982; 1989) aunque predomina una dirección máxima de extensión próxima a ENE-SWS (Arlegui *et*

*al.*, 2005). Durante esta tercera etapa también se generan las fosas del Río Grío y Munébrega (Gutiérrez *et al.*, 2012, 2013) (Fig.2).

Este régimen tectónico se mantiene durante todo el Cuaternario, produciéndose la reactivación de fallas normales en casi todos los bordes de las fosas neógenas (Simón, 1982, 1983).

El campo extensional neógeno-cuaternario continúa activo en la actualidad, según los tensores de esfuerzos inferidos a partir de mecanismo focales de sismos asociados a fallas normales y alineaciones epicentrales NW-SE que indican una extensión NE-SW similar existente durante el Plioceno superior-Cuaternario en la fosa del Jiloca (Arlegui *et al.*, 2005; Lafuente, 2011).

### 3.3. Estratigrafía

La zona de estudio presenta materiales paleozoicos (Ordovícico y Silúrico), mesozoicos (Triásico y Jurásico) y cenozoicos (Neógeno y Cuaternario). A continuación, se describirán brevemente los materiales presentes en la zona según Hernández Samaniego *et al.*, (1980) (ver mapa en Anexo 2).

#### 3.3.1. Paleozoico

El Ordovícico inferior aflora en todo el margen oeste y sur de la zona. Está compuesto por cuarcitas y pizarras, denominadas en la zona “Pizarras de Santa Cruz”. Por encima se encuentra la “Cuarcita Armórica”, compuesta por ortocuarcitas y cuarcitas arenosas, que afloran en la Sierra de Algairén y de Vicor. El Ordovícico superior también aflora en la Sierra de Algairén: consiste en pizarras, areniscas y calizas agrupadas en la unidad “Llandeilo-Llandovery” (Hernández Samaniego *et al.*, 1980).

En cuanto al Silúrico inferior, aflora también en la Sierra de Algairén: consiste en ortocuarcitas de la “Cuarcita Llandoveryense” (parecida a la Cuarcita Armórica) sobre las que se disponen las “Pizarras de Graptolites”, las cuales se encuentran recubiertas en discordancia por el Triásico inferior en facies Buntsandstein en los alrededores de Alpartir (Hernández Samaniego *et al.*, 1980).

#### 3.3.2. Mesozoico

El Triásico aflora en la zona centro-este de la zona de estudio, con afloramientos alargados en dirección NO-SE. Se distinguen las facies Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper. La facies Buntsandstein está representada por una serie con tres tramos diferenciados de base a techo:

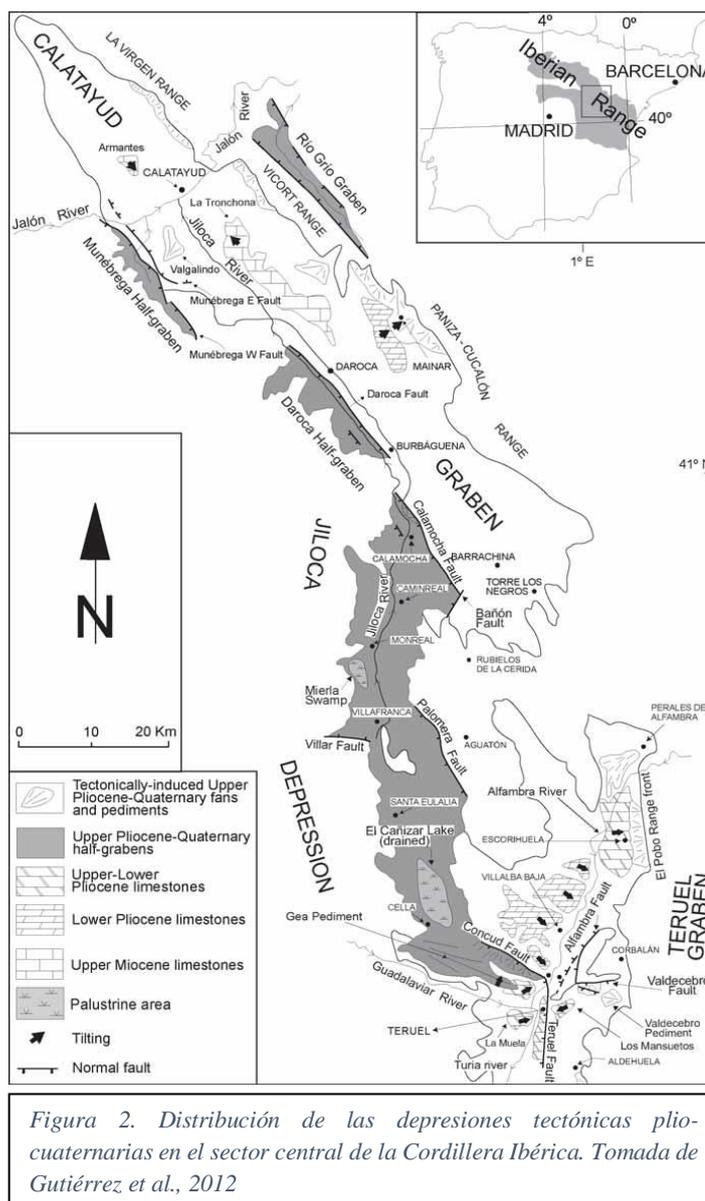


Figura 2. Distribución de las depresiones tectónicas plio-cuaternarias en el sector central de la Cordillera Ibérica. Tomada de Gutiérrez *et al.*, 2012

conglomerados y limolitas, areniscas rojas y limolitas, y limolitas rojas con intercalaciones de areniscas. En las facies Muschelkalk se puede distinguir: un tramo inferior compuesto por arcillas, yesos y calizas arcillosas y un tramo superior más desarrollado de dolomías y calizas tableadas con intercalaciones de margas. Los materiales de la facies Keuper se componen de arcillas con niveles intercalados de yesos rojos.



Figura 3. Falla del Río Grío en un talud de la A-2, afectando al Jurásico superior (Malm).

En la parte NE de la zona, afloran materiales del tránsito Triásico- Jurásico, compuestos por dos tramos: dolomías vacuolares (“carniolas”) y brechas calizo-dolomíticas (Hernández Samaniego *et al.*, 1980).

En la zona NE también aflora el Jurásico, consistente en calizas con intercalaciones de margas hacia techo (Lías inferior y medio), una serie monótona de margas y calizas arcillosas (Dogger), y calizas arcillosas y arenosas (Malm), que afloran de forma aislada al sur de Morata (Hernández Samaniego *et al.*, 1980). En un tramo de talud de la A-2, se observa un corte representativo de un segmento de la Falla del Río Grío, con un significativo espesor de roca de falla afectando a estos últimos materiales (fig.3).

### 3.3.3. Cenozoico

Los materiales cenozoicos de esta zona (Plioceno, Pleistoceno y Holceno) afloran discordantes a los anteriores materiales, a lo largo de toda la zona de estudio. Los materiales Plio-cuaternarios presentes, están representados en la zona central y NE por conglomerados con lentejones de arcillas rojas (fig.8); al sur de Morata de Jalón por depósitos de abanicos de sedimentos limo-arenosos de color marrón rojizo, con cantos angulosos de cuarcita y pizarras; al sur de Morata de Jalón, en las Sierras de Vicor y cerca del Río Grío, se observan depósitos de bloques y cantos redondeados de cuarcita inmersos en una matriz arenosa, que bordean elevaciones paleozoicas; en las laderas de la zona central y norte del río Grío, afloran depósitos de conglomerados de cantos redondeados de cuarcita y arenisca, con matriz limo-arenosa (Hernández Samaniego *et al.*, 1980).

En cuanto a los materiales cuaternarios, el Pleistoceno corresponde con las terrazas de los ríos Jalón y Grío y en el Holoceno se distinguen diferentes tipos de depósito: conos de deyección situados en los márgenes del Río Jalón, depósitos coluviales, zonas con cuaternario indiferenciado y depósitos de la llanura de inundación de los ríos Grío y Jalón (Hernández Samaniego *et al.*, 1980).

Debido a que los materiales pliocuaternarios y cuaternarios son imprescindibles en este trabajo para la caracterización de la actividad reciente de las fallas, se ha ampliado su descripción mediante datos propios tomados durante las observaciones de campo destinadas a la caracterización de estructuras.

En general, los materiales Plio-cuaternarios corresponden con depósitos aluviales (glacis), que modelan y se disponen sobre diferentes materiales (muchos de ellos sobre Ordovícico, ver fig.15). Un ejemplo, aparece en un tramo N-S de las nuevas carreteras variantes de la autonómica A-2302 y la N-IIa (fig.6; coordenadas en Anexo I, tabla 1 “depósito aluvial”). Al sur de este talud (Fig.4), se observan unas calizas arcillosas del Jurásico medio (Dogger) con orientación 120/40 SW. Se diferencian tres unidades plio-cuaternarias de base a techo. La unidad 1 está conformada por gravas y arenas fluviales con cantos que alcanzan los 35 cm., discordantes sobre calizas jurásicas. La unidad 2 es un depósito aluvial formado por lutitas arenosas rojas con intercalaciones de gravas con matriz lutítica, cuyos cantos presentan tamaño centimétrico. En esta zona se distingue algún cuerpo canaliforme con cantos angulosos de 1 a 7 cm de diámetro. La unidad 3 consiste en gravas con matriz lutítica, con

intercalaciones de lutitas. En esta zona se distinguen numerosos cuerpos canaliformes rellenos por cantos. Se trata de un depósito aluvial que forma una cubierta de glaciais.

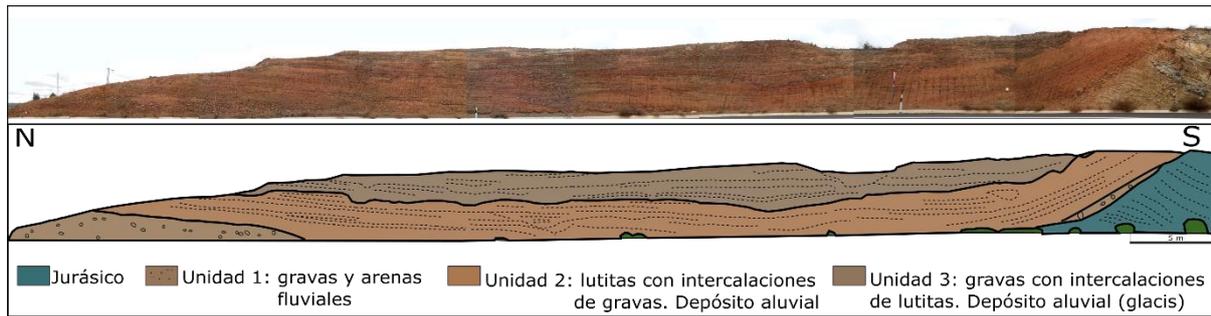


Figura 4. Talud N-S perteneciente a la nueva carretera variante de la A-2302 y la N-IIa. Descrito en el texto.

Se han diferenciado cuatro niveles de terrazas del Río Grío (a 0, 6, 13 y 20 m sobre el cauce). Como rasgo general destaca la potencia de las terrazas en relación al poco caudal que presenta actualmente el Río Grío. Para caracterizar con mayor detalle estas terrazas Pleistocenas, se describen dos taludes perpendiculares (fig.6; coordenadas en Anexo I, tabla 1 “Terrazas”) de hasta 4 m de altura con dirección N-S y E-W (fig.5). Estos taludes cortan la parte interna de la terraza 2 (sobre unos 6 m del cauce), permitiendo diferenciar tres tramos de base a techo (Q1, Q2 y Q3):

-El tramo Q1 está formado por cantos subredondeados y heterométricos inmersos en una matriz lutítica de color marrón rojizo. Los cantos varían de tamaños milimétricos hasta 20 cm y presentan composición principalmente cuarcítica. La parte superior de este tramo presenta cantos de mayor tamaño.

-El tramo Q2 consiste en una alternancia de lutitas y arenas de color marrón claro con gravas. Los cantos son de tamaño homogéneo de hasta 5 cm.

-El tramo Q3 se compone de cantos heterométricos dispersos en una matriz lutítica de color marrón rojizo.



Figura 5. Terrazas del Río Grío. a) Taludes E-W y S-N en el que observa la continuidad lateral de los tres tramos descritos en el texto. b) detalle del talud S-N, en la que se observan las características de los tres tramos diferenciados.

#### 4. RESULTADOS

A continuación, se expondrá tanto la estructura general de la zona como las observaciones sistemáticas realizadas sobre los afloramientos estudiados en campo que presentan características destacables. En la figura 6 se muestra la ubicación de cada afloramiento dentro del contexto geomorfotectónico (coordenadas en Anexo I, tabla 1).

##### 4.1 Estructura general

Para el análisis de la estructura general de la zona, se lleva a cabo un estudio desde geomorfológico y tectónico. Se ha realizado una cartografía geomorfotectónica (fig.6), en la cual las trazas de las fallas se evidencian como anomalías geomorfológicas, en forma de lineamientos. Los principales lineamientos corresponden con anomalías en la red de drenaje, en ocasiones ligadas a zonas donde parten los depósitos aluviales pliocuaternarios. Otro tipo de lineamientos corresponde con los contactos rectilíneo entre materiales paleógenos, mesozoicos y paleozoicos y materiales cuaternarios. También se ha tenido en cuenta otros criterios como la presencia de facetas triangulares, aunque considerando que se trata de evidencias con otro posible origen. Para completar la cartografía geomorfotectónica, se han valorado los datos obtenidos a escala de afloramiento.

El mapa geomorfoestructural (fig.6), antes de haber sido completado con los datos de afloramiento, presenta: (1) Fallas dominantes de dirección NNW-SSE y (2) lineamientos E-W de menor entidad, que también se han observado desde fotografía aérea y corresponden con contactos rectilíneos entre materiales principalmente mesozoicos y paleozoicos y depósitos cuaternarios. Se sospecha que estos contactos lineales corresponden con fallas de dirección E-W.

Las fallas dominantes NNW-SSE, presentan las siguientes características observables en la cartografía geomorfotectónica (fig.6): (1) Las fallas no presentan una traza continua, pero sus segmentos se pueden relacionar en la dirección NNW-SSE y constituir trazas de falla mayores; (2) presentan longitudes kilométricas; (3) En la zona centro-oeste del mapa, estas fallas parecen generar un sistema de horst y graben, en el que el área levantada del Monte blanco corresponde con un horst, al igual que la franja NNW-SSE que se encuentra al sur de Morata de Jalón.

El graben situado al oeste del horst del Monte blanco, está limitado por dos fallas normales. Su falla oeste presenta una longitud de 6,3 km y su falla este de 4,5 km. El graben situado al este del Monte blanco se encuentra limitado al oeste por una falla con longitud total de 8 km, compuesta por tres segmentos, uno norte con 2,6 km; un segmento intermedio de 1,7 km de longitud y un segmento sur de 3,3 km de longitud. La falla que limita el graben por el este presenta una longitud total de 10 km, y está compuesto por un segmento sur de 2 km que discurre paralelo al río Grío por su margen este, se separa de segmento norte por 2,7 km, y el segmento norte presenta 5,3 km de longitud (comienza en la zona central del área de estudio y se prolonga hasta el SW de Morata de Jalón, esta vez por el margen este del río).

El horst de la zona sur de Morata de Jalón presenta hacia el este, dos fallas normales que no terminan de formar un graben. La falla que constituye el margen este del horst presenta una longitud de 3 km y la siguiente hacia el NE una longitud de 1,6 km.

En grandes rasgos, se pueden distinguir 6 fallas con longitudes variables entre 1,6 y 10 km de longitud, aunque se debe tener en cuenta que son fallas discontinuas. En general, en las zonas de graben es donde se encuentran los depósitos aluviales pliocuaternarios, a excepción de la zona de Morata de Jalón.

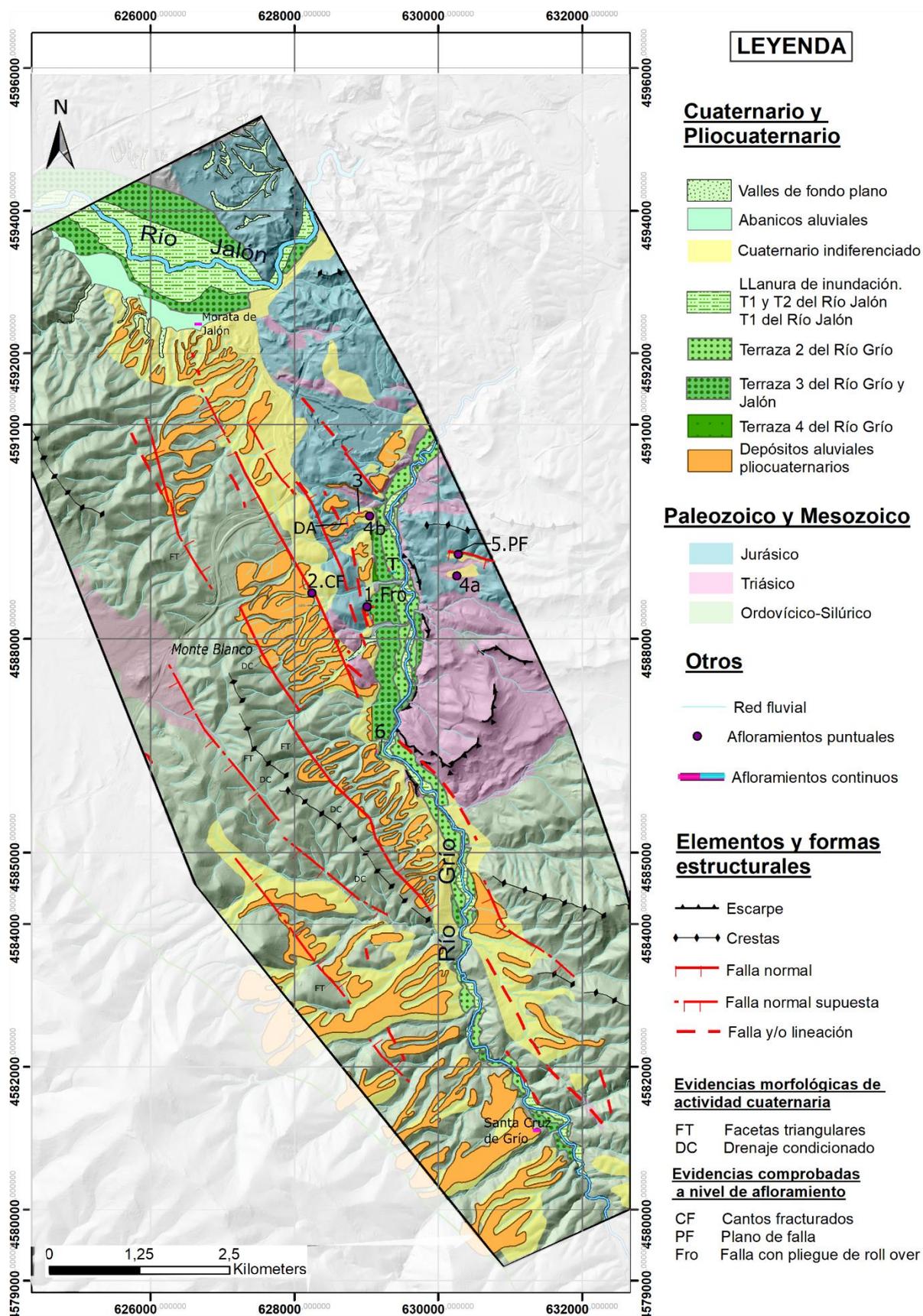


Figura 6. Mapa geomorfotectónico de la zona de estudio. DA: afloramiento del depósito aluvial; T: afloramiento de terrazas; 1-7: afloramientos numerados.

## 4.2 Análisis de estructuras a escala de afloramiento

El análisis de las estructuras a escala de afloramiento es fundamental para caracterizar una posible actividad cuaternaria de las fallas del Río Grío. Cada afloramiento de este apartado será descrito y en ocasiones, se incluye una interpretación básica que ayudará a exponer de una forma más general las interpretaciones del apartado 5. Se han descrito un total de 7 afloramientos.

### 4.2.1 Afloramientos con estructuras deformacionales

En este primer párrafo se hace un breve comentario sobre la estructura del afloramiento de los depósitos aluviales pliocuaternarios (fig.4). En este afloramiento (fig 4), las tres unidades dibujan un suave sinclinal. En el lado norte, las capas están ligeramente vasculadas hacia el sur. Sin embargo, en el extremo sur las capas presentan un alto buzamiento aparente hacia el norte. Es posible que se trate de una paleopendiente. Sin embargo, el buzamiento aparente induce a pensar que en esta zona se haya producido algún tipo de deformación.

#### *Afloramiento 1*

En la nueva carretera (variante de la antigua N-II y la autonómica A-2302) se estudian tres taludes de dirección SSW-NNE (coordenadas en Anexo I, tabla 1) como un mismo afloramiento. Para su análisis se ha realizado un corte, relacionando lateralmente estos taludes.

En el extremo N-NE (fig.7) afloran las calizas arcillosas del Jurásico medio. De forma discordante se disponen materiales plio-cuaternarios, entre los que se pueden distinguir 3 unidades de base a techo.

-La unidad A consiste en un depósito de gravas con matriz lutítica de color marrón rojizo. Los cantos son subredondeados y presentan tamaños de milimétricos hasta 25 cm. En la zona de contacto con las calizas, los cantos se encuentran alineados de forma paralela al plano.

-La unidad B consiste en un depósito de abanico aluvial, se trata de intercalaciones de limos y gravas. En la zona intermedia las capas presentan una orientación 060/11N

-La unidad C se encuentra a su vez dividida en tres tramos, dos tramos compuestos por limos de color crema, y un tramo intermedio en el que dominan los bloques de tamaño métrico.

Los materiales plio-cuaternarios presentan una estructura de monoclinal con buzamiento hacia el N-NE. Sin embargo, las capas de la zona Norte buzan hacia el Sur. La orientación del contacto entre la unidad A y el jurásico tiene orientación 087/ 48 S. Cabe destacar que los cantos se disponen de forma paralela a este plano y su buzamiento es demasiado elevado como para tratarse de una paleopendiente<sup>1</sup>. Dado que el ángulo de rozamiento de los cantos es de 31°, significa, que los cantos de la unidad 1 no se han podido depositar de manera original en una paleopendiente de 48°. Por lo tanto, se considera que se trata de una falla normal (F1) que ha puesto en contacto el Plio-cuaternario con el Jurásico. El movimiento normal de esta falla, ha generado un pliegue de *roll-over* (fig.7c) en la unidad A y B (el

---

<sup>1</sup> \* Se realizó una prueba de rozamiento con los cantos planos que se situaban paralelos al contacto. Se seleccionaron dos cantos representativos, se sitúa uno encima de otro y se va aumentando ligeramente la pendiente hasta encontrar el ángulo de rozamiento estadístico de los cantos. Esta prueba se repite con los cantos húmedo.

cual se erosionó antes del depósito de la unidad C), y el consiguiente depósito gravitacional de cuña coluvial (Unidad C) de forma sintectónica a actividad de la falla.

Teniendo en cuenta todos los afloramientos (fig.7a), se interpreta, por la relación entre los materiales de los afloramientos, que se han producido dos fallas normales (F1 y F2) que generan en las capas del bloque hundido un pliegue de *roll over*. Además, en la zona intermedia se observa una pequeña zona de falla zona de falla (F3) que buza hacia el N-NE.

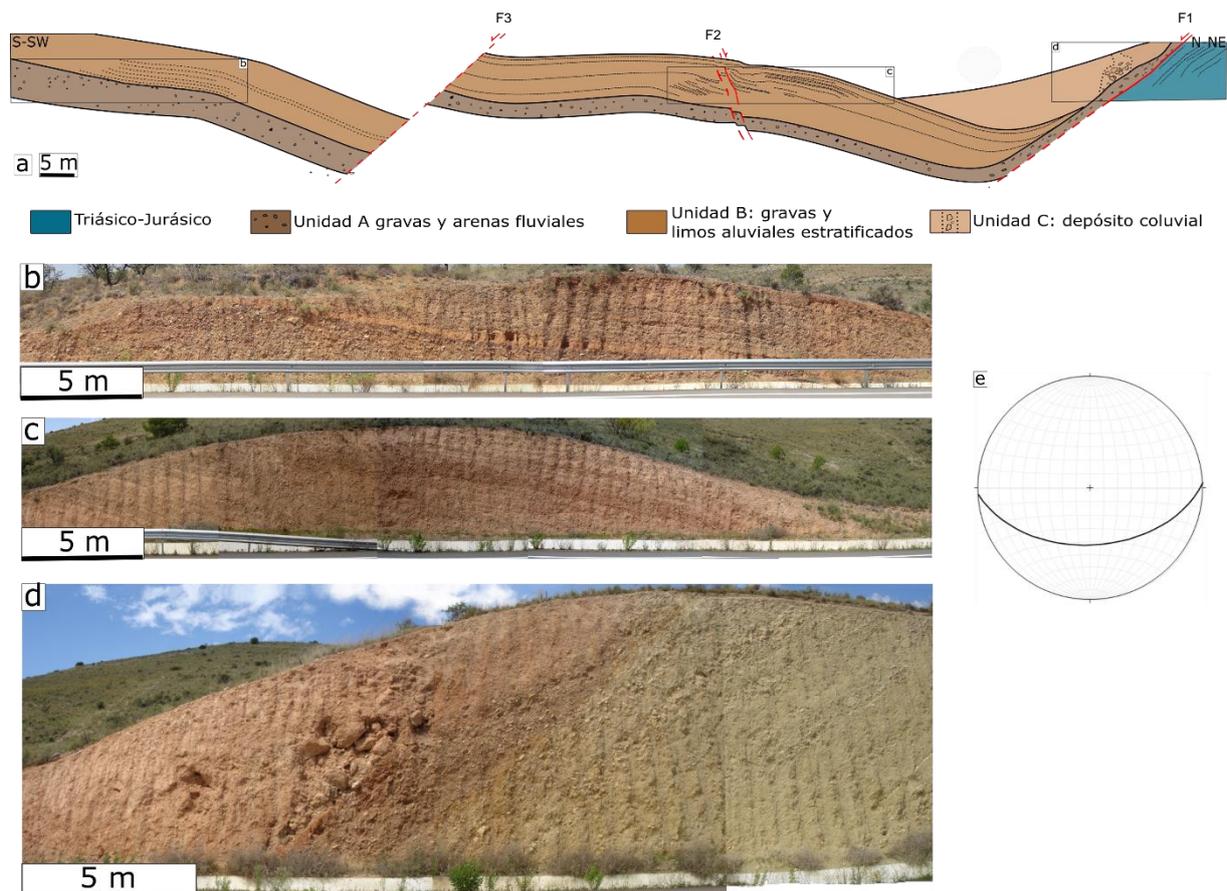


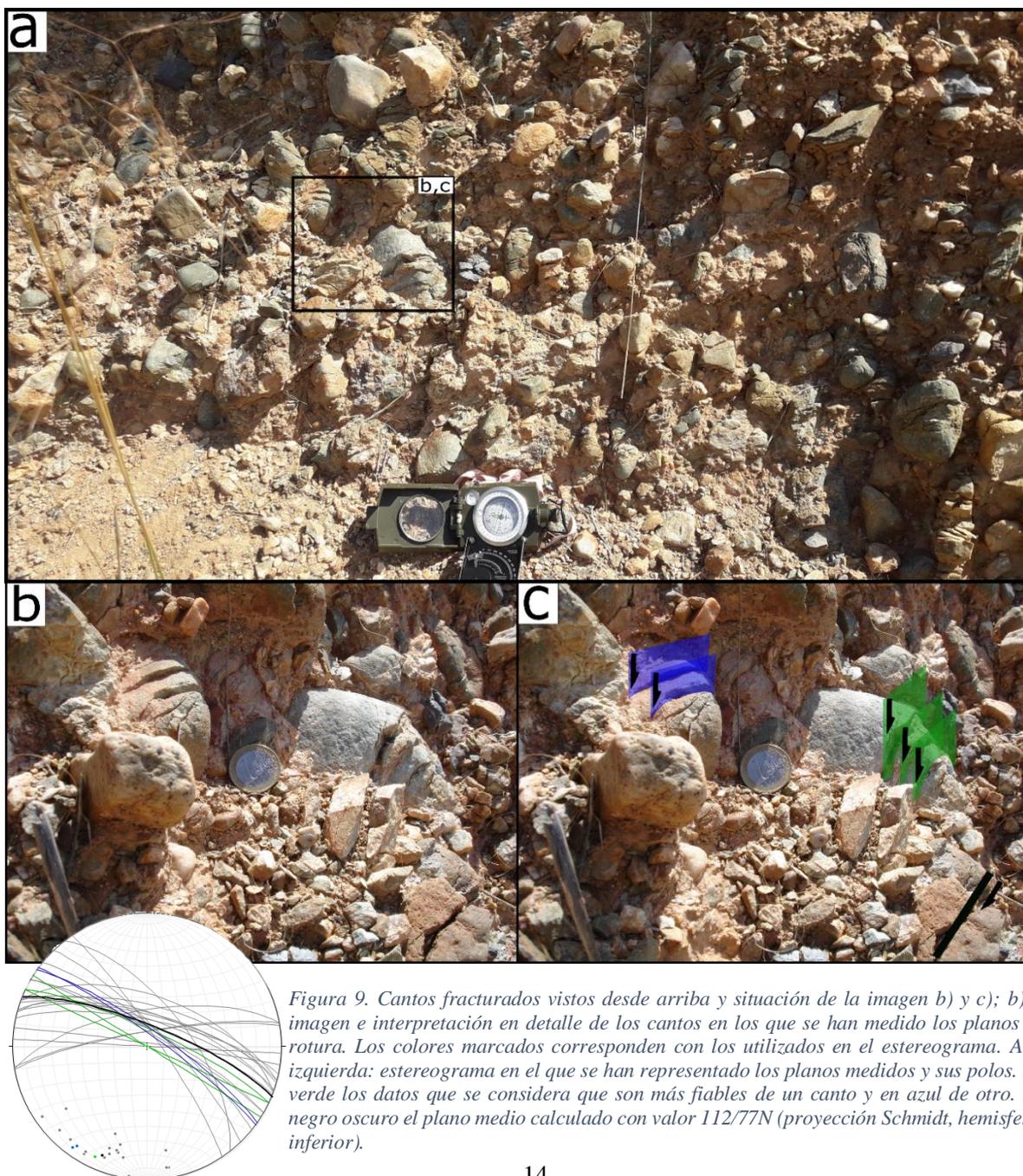
Figura 7. Afloramiento 1. a) Corte general en el que se han relacionado los tres taludes. b)c)y d) fotografías panorámicas de cada talud, en los que se observan las estructuras explicadas. e) Estereograma de la F1 (087/48 S). (proyección Schmidt, hemisferio inferior).

### Afloramiento 2

En una zona de la traza de la falla del Río Grío (fig.8) que atraviesa glaciais plio-cuaternarios (fig.6; coordenadas en Anexo I, tabla 1), se ha encontrado un afloramiento compuesto por cantos redondeados inmersos en una matriz limosa y sin estratificación marcada. Estos cantos se encuentran fracturados *in situ*. Se han medido los planos de fractura (fig.9) y se ha calculado que el plano medio presenta orientación 112/77N.



Figura 8. Imagen panorámica en la que se observan los materiales aluviales pliocuaternarios partiendo de una zona más alta y chocando con materiales jurásicos. A izquierda de la imagen, se observa una depresión correspondiente a una traza de una falla, en la que se sitúa el afloramiento 2.



### Afloramiento 3

En este afloramiento, se han estudiado dos taludes en dirección E-W (fig.6; coordenadas en Anexo I, tabla 1). Se han distinguido 4 unidades de base a techo (figura 11): (1) calizas y margas arcillosas del Jurásico medio (Dogger); (2) materiales cuaternarios compuestos por lutitas rojizas y cantos angulosos calcáreos que varían de 1 cm a 7 cm; (3) gravas (con matriz lutítica) con intercalaciones centimétricas de lutitas rojizas; (4) gravas (de matriz lutítica) y lutitas con estratos métricos. Los cantos alcanzan hasta 20 cm de diámetro.

Observando ambos taludes, se observa una estructura general sinforme, que se va profundizando hacia el E, donde los materiales presentan una mayor potencia. Principalmente en esta zona, se detecta una concentración de fallas para las cuales se ha calculado una dirección media 052/57 S. Los materiales presentan una componente dúctil ya que acomodan la deformación por falla mediante pliegues. También se observan zonas con acumulaciones de cantos que parecen corresponder con pequeños colapsos.

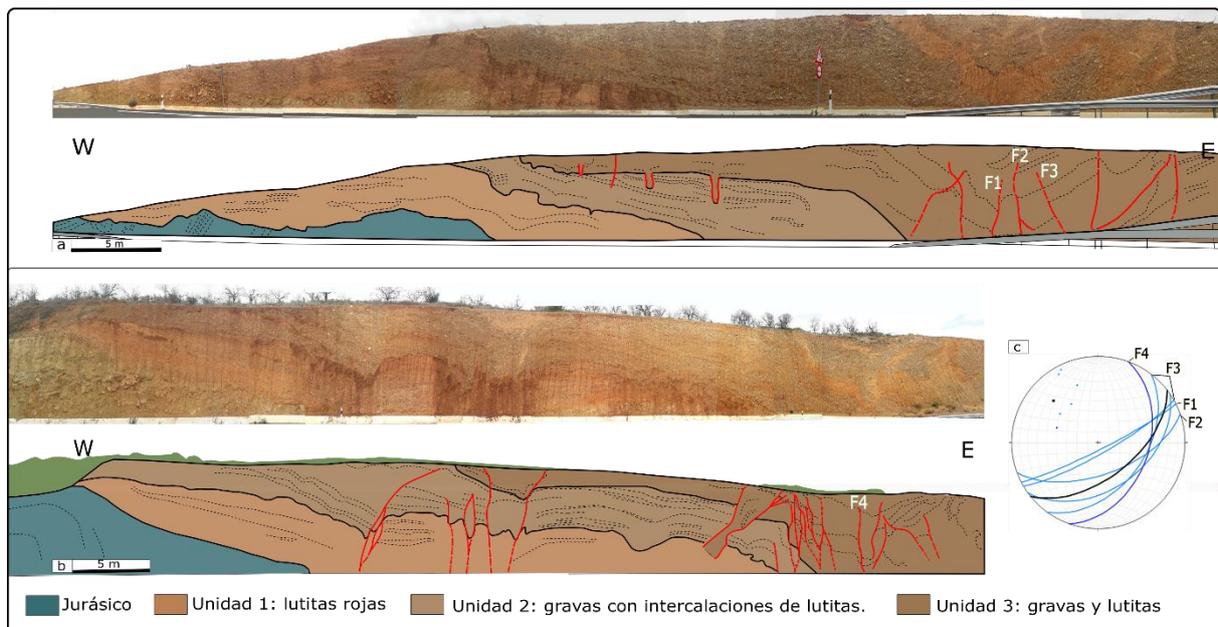


Figura 10. a,b) Panorámicas y cortes del afloramiento 3, en el que se observan las unidades y estructuras comentadas en el texto. c) estereograma con los planos de falla marcados en los cortes, y plano medio en negro (proyección Schmidt, hemisferio inferior).

#### 4.2.2 Otros

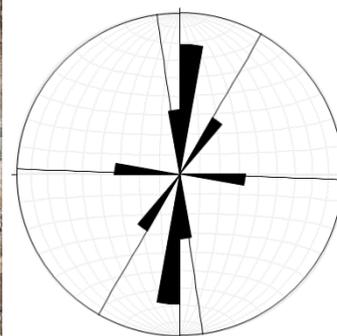
Este apartado se ha denominado así, ya que se trata de estructuras menores o menos claras y que no corresponden con la clasificación realizada en los otros puntos de este apartado.

##### *Afloramiento 4*

En algunos caminos en los que aflora material cuaternario, se han observado fracturas en el suelo. En este caso, se han diferenciado los afloramientos 4a y 4b por presentar diferente ubicación (fig.6; coordenadas en Anexo I).

El afloramiento 4a presenta fracturas con dirección media 030 (fig.13). En el afloramiento 4b se ha encontrado una fractura rellena por material carbonatado de dirección 185 (fig,12).

*Figura 11. Afloramiento 4b. Fractura rellena por material carbonatado. La brújula está orientada hacia el Norte*



*Figura 12. Fracturas del afloramiento 4a, en la imagen la brújula está orientada hacia el Norte. A la izquierda: diagrama de rosas de las fracturas medidas, donde se observa la dominancia de fracturas 030.*

##### *Afloramiento 5*

Durante la observación de fotografía aérea, se han observado contactos rectilíneos entre materiales generalmente mesozoicos y paleozoicos, en los cuales se ha sospechado la presencia de un contacto por falla. En este caso, se ha observado un contacto con orientación WNW-ESE entre las “carniolas” del tránsito Triásico Jurásico con materiales posiblemente cuaternarios por tratarse de campos de cultivo. En campo, se ha confirmado la presencia de cuaternario, y a lo largo del contacto se ha encontrado una costra carbonatada con orientación 094/50S y una anchura de entre 2 y 4 cm (Fig. 14).

Es decir, se trata de un afloramiento de un plano de falla que pone en contacto materiales de edad cuaternaria con materiales Triásico-Jurásicos y ha sido posteriormente rellena por cemento carbonatado.

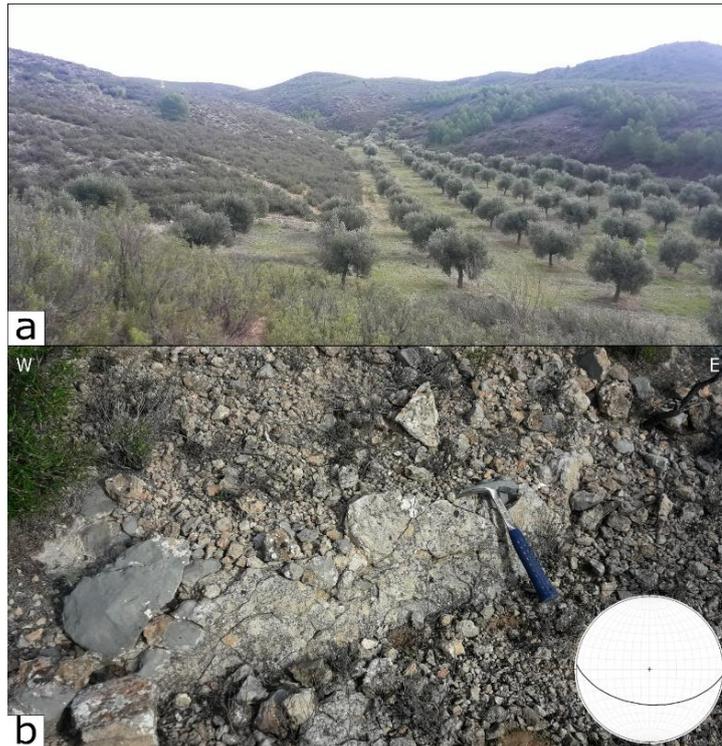


Figura 13. a) contacto rectilíneo E-W entre Triásico-Jurásico y cuaternario. b) imagen del relleno carbonatado que indica la orientación del plano de falla, y representación del plano en estereograma (proyección Schmidt, hemisferio inferior). El martillo mide 32 cm de longitud.

#### 4.2.3 Afloramientos con indicios de deformación tectónica no concluyente

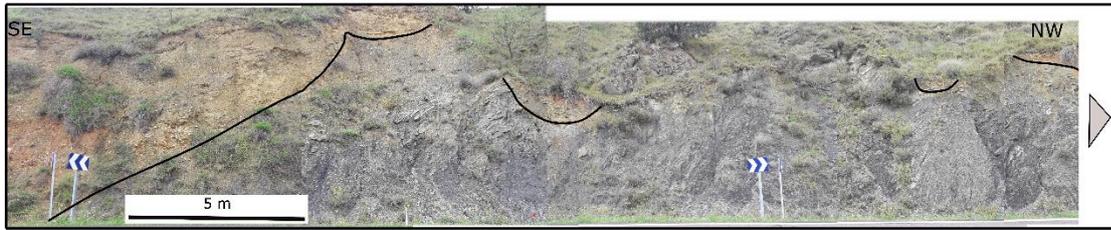
##### Afloramiento 6

En una zona de curva de la carretera A-2302 existe un talud que varía de SE-NW a dirección S-N (fig.6 y coordenadas en Anexo I, tabla 1). En ese talud se observan cuarcitas y pizarras negras del ordovícico inferior, sobre el cual se asientan discordantemente materiales cuaternarios mediante un contacto muy irregular (Figura 15).

Al SE se observa un depósito aluvial pliocuaternario con matriz limosa de color marrón claro y cantos de hasta 22 cm. Estos materiales buzcan hacia el SE con alta pendiente. En la parte central los cantos se encuentran desordenados y presentan menor tamaño. En esta zona el contacto es muy irregular. En la parte NW el contacto entre los materiales presenta una estructura sinclinal, en la que los materiales cuaternarios presentan un buzamiento hacia el sur y estratificación cruzada. En el extremo norte, los materiales pasan a buzarse hacia el norte y presentan un plano de contacto con el Ordovícico de orientación 125/35 N. Más hacia el norte, únicamente afloran los materiales cuaternarios, que se disponen de forma horizontal.

La zona SW y N presentan estructuras sedimentarias claras, por lo que se puede pensar que el plano medido en la zona norte corresponde con un paleorelieve. Sin embargo, la zona intermedia no presenta estructuras sedimentarias, y en ella los cantos se encuentran muy desordenados, por lo que se plantea que han podido sufrir algún tipo de alteración tectónica.

Parte 1



Parte 2



Parte 3



Figura 14. Fotografías panorámicas del afloramiento 6 explicado en el texto y estereograma de la paleopendiente (proyección Schmidt, hemisferio inferior).

### Afloramiento 7

El afloramiento corresponde a un talud de dirección SW-NE (fig.6 y coordenadas en Anexo I, tabla 1). En este talud se han diferenciado 4 unidades separadas por tres fallas (fig.16).

Al suroeste, se observan materiales plio-cuaternarios con matriz lutítica de color marrón claro y con cantos subangulosos a angulosos. Los cantos presentan una composición principal cuarcítica y varían de tamaños milimétricos hasta los 10 cm. Estos materiales buzcan hacia el NE y se interrumpen contra la falla 1 (F1), la cual presenta una orientación 165/85E.

En la unidad intermedia, se pueden observar dos zonas. Una zona que presenta bloques de hasta 1 metro con relleno lutítico y una zona NE en la que se distingue ligeramente la estratificación. Hacia el NE, la falla 2 (F2) pone en contacto estos materiales con las calizas arcillosas del Jurásico medio (Dogger). El plano de falla 2 presenta orientación 106/75 S y estrías de falla con cabeceo 27W y una componente de desgarre sinixtra.

Al NE, las calizas del Jurásico medio se encuentran muy brechificadas y definen un pliegue sinclinal, que se interrumpe mediante una falla (F3) lo pone en contacto con un tramo más margoso del Jurásico medio.

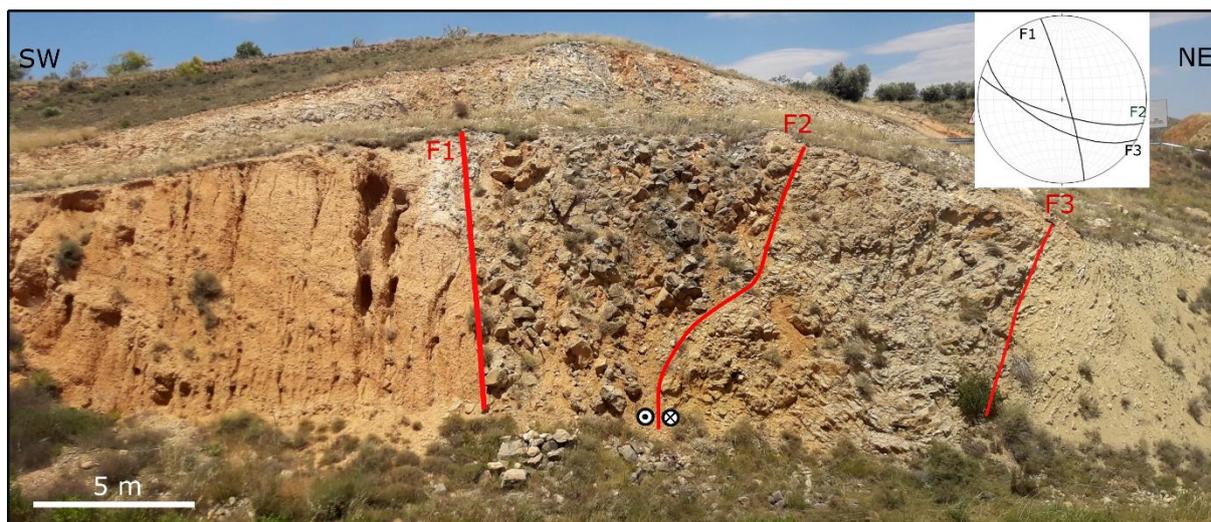


Figura 15. Afloramiento 7. Talud en el que se observan los materiales y estructuras explicadas en el texto, así como un estereograma mostrando la orientación de los planos de falla. (proyección Schmidt, hemisferio inferior).

## 5. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIONES

A continuación, se interpretan las estructuras encontradas, partiendo ya de una primera interpretación básica en cada afloramiento y de la estructura general de la zona (fig.6). Posteriormente se procederá a realizar una interpretación a escala regional.

### 5.1 Interpretación de las estructuras

Se han interpretado las diferentes estructuras, relacionándolas con su contexto geomorfotectónico, para valorar la utilidad de los afloramientos en la caracterización de la falla del Río Grío.

#### 5.1.1 Estructuras kársticas.

El afloramiento 3 presenta, como se ha comentado anteriormente, una estructura sinclinal con una zona más hundida, donde se concentran fallas, y los materiales se ajustan a la deformación de forma dúctil. Por estos criterios, esta estructura parecen corresponder con deformaciones kársticas, de forma que se producirían colapsos por disolución y engrosamiento de las unidades sedimentarias contemporáneamente con el movimiento.

El afloramiento 7 ha resultado más complicado de interpretar. La falla 1 del afloramiento 7 parece presentar una dirección parecida a las fallas del río Grío e incluso una continuidad con un segmento de falla cartografiado, sin embargo sus otras dos fallas presentan unas direcciones más WNW-ESE. Se han planteado dos hipótesis: (1) Cabe la posibilidad de que se trate de un relleno fisural, en el que la falla 2 ha actuado como una falla normal (presentando estrías de falla heredadas), y el material cuaternario haya aguantado el suficiente tiempo como para que se produzca el relleno de la unidad de bloques. (2) En el caso de considerar que las estrías de falla de la F2 no son heredadas, se podría pensar que la falla se ha movido con componente sinistral durante el Pliocuatrnario y se haya producido el relleno de algún hueco por la unidad de bloques. La interpretación 1 parece más coherente con el régimen extensional de la Cordillera Ibérica durante el plio-cuatrnario.

Según otros autores (Gutiérrez *et al.*, 2013), estos afloramientos corresponden con colapsos paleokársticos asociados a las evaporitas triásicas. En base a esta información, este afloramiento se considera también paleokárstico, ya que no hay evidencias suficientes que afirmen las hipótesis realizadas.

### **5.1.2 Estructuras tectónicas.**

Las estructuras tectónicas, se van a relacionar mediante la cartografía geomorfotectónica, con las fallas a las que aporta evidencias, ya sean las fallas principales NNW-SSE o fallas E-W.

#### **a) Evidencias sobre las fallas principales NNW-SSE**

Los cantos fracturados del afloramiento 2 presentan un plano medio de fracturación 112/77N, es decir, WNW-ESE y se pueden considerar fracturas de Riedel asociadas a una banda de cizalla. Esta dirección no corresponde con la dirección principal de la falla, sin embargo, en la cartografía geomorfológica se observa la zona del afloramiento coincide con un requiebro de la falla, en la que la dirección se desvía ligeramente hacia la normbrada para después continuar con su trayectoria principal.

Estos cantos, están asociados a la falla que presenta mayor longitud en la zona de estudio, por lo que queda claro, que al menos su segmento Norte ha presentado actividad cuaternaria.

#### **b) Evidencias sobre otras fallas de dirección E-W**

El afloramiento 1 presenta una falla de dirección E-W (087/48 S) que genera un pliegue de *roll over*. En la cartografía, esta falla se sitúa cerca de un posible tramo de una de las fallas del Río Grío (fig.6). En cuanto al plano de falla del afloramiento 5 presenta una orientación 094/50S, es decir, casi E-W. En este caso, esta falla sería casi perpendicular a la falla del Río Grío.

La presencia de estas evidencias, permite cartografiar en el mapa geomorfotectónico (fig.6) fallas en dirección E-W de menor entidad que las fallas principales NNE-SSW, mostrando que esa dirección tiene cierta relevancia en la neotectónica de la zona.

### **5.1.3 Fracturas**

El afloramiento 4 presenta una orientación de las fracturas es principalmente NNE-SSW. Esta dirección puede ser significativa de cara a la interpretación general que se presenta más adelante.

### **5.1.4 Afloramiento con indicios de deformación tectónica no concluyente**

El afloramiento 6, como se ha explicado anteriormente, presenta zonas con clara componente sedimentaria. Sin embargo, la zona intermedia (en la que los cantos se encuentran desordenados) no corresponde con un simple depósito sedimentario, sino que podría deberse a procesos tectónicos. Se considera que en este afloramiento todavía no se han encontrado suficientes evidencias para relacionarlo con la actividad reciente de la falla del Río Grío. Por otra parte, el afloramiento de materiales aluviales pliocuaternarios (fig.4) se incluye en este apartado por el mismo motivo. A pesar de esto, de alguna manera queda claro que los materiales cuaternarios de estos afloramientos presentan algún tipo de alteración debida a la tectónica.

## 5.2. Interpretación a mayor escala

Retomando los resultados obtenidos mediante la cartografía geomorfotectónica, se considera que el conjunto de las fallas NNW-SSW cartografiadas representan la Zona de Falla del Río Grío con una anchura en esta zona de unos 5 km y con fallas de hasta 10 km de longitud. Con menor magnitud, se encuentran las fallas E-W. Estas fallas en ocasiones se encuentran asociadas a las fallas principales, como parte de una zona de relevo, o pueden encontrarse de manera independiente.

La mayor parte de los indicadores encontrados son compatibles con movimientos de falla normal. Además, la estructura general definida por las estructuras de escala kilométrica muestra horst y graben, también indicadores de tectónica extensional.

En relación a los esfuerzos distensivos que generan estas fallas normales, las fallas principales NNW-SSW se pueden generar mediante extensión dominante ENE-WSW o incluso E-W. Las fallas E-W de la zona, no se explican mediante esfuerzos distensivos de en dirección principal E-W. Estas, podrían haberse generado bajo esfuerzos extensionales dominantes N-S.

La presencia de distintas orientaciones de fallas normales, se puede explicar atendiendo a una extensión de tipo radial. Este régimen se caracteriza por que las trayectorias del eje  $\sigma_1$  son próximas a la vertical y los ejes de extensión  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  presentan valores muy similares, de forma que es muy fácil que se produzca el intercambio de esos dos ejes principales de esfuerzos, dando lugar al movimiento consecutivo de fallas en dirección N-S y E-W. Esta extensión de tipo radial ocurre en la Cordillera Ibérica centro-oriental (en la que se produce un esfuerzo distensivo desde el Plioceno), como en el caso de la fosa del Jiloca (Simón *et al.*, 2008; Pereiro, 2016).

Si consideramos que en Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica los campos extensionales presenten también un carácter de extensión radial, la presencia de fallas prácticamente perpendiculares a la falla del Río Grío puede ser coherente.

## 5.3. Recomendaciones futuras

La presencia de fallas que han presentado actividad cuaternaria, como las fallas presentes en la Zona de Falla del Río Grío de este trabajo, sugiere ser tomada en cuenta cuando se trata de la construcción de una infraestructura de tal magnitud como la embalse de Mularroya, ya que un mal funcionamiento de esta presa afectar gravemente a las poblaciones que habitan aguas abajo.

## 6. CONCLUSIONS

The conclusions of this work are the following:

- 1) The mapped Río Grío Fault is represented by several NNW-SSE direction segments. They are up to 10 km in length and affect a large area 5 km long in the studied zone.
- 2) The faults of the Río Grío Fault Zone that present indicators of Plio-Quaternary activity are related to the “old” trace (formed during Permian times and re-activated during the Mesozoic and the Cenozoic) of the Río Grío fault, due to their being areas of weakness.
- 3) With the applied criteria and the indicators obtained, it can be considered that this fault has been active during the Pliocene and/or the Quaternary, under a regime of radial extension. Besides, It is possible that the fault can be reactivated by anthropogenic effects.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mis tutores, Antonio Casas y José Luis Simón por toda la ayuda que me han brindado y por la paciencia que han tenido para transferirme sus conocimientos. También agradecer a Marcos Marcén y Alba Peiro por su plena disposición ante todas mis dudas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Arlegui, L. E., Simón, J. L., Lisle, R. J., y Orife, T. (2005): Late Pliocene–Pleistocene stress field in the Teruel and Jiloca grabens (eastern Spain): contribution of a new method of stress inversion. *Journal of Structural Geology*, 27: 693-705.
- Calvín-Ballester y Casas (2014): Folded Variscan thrusts in the Herrera Unit of the Iberian Range (NE Spain). *Geological Society*, London, Special Publications, 394: 39–52.
- Casas, A y Faccenna, C. (2001): Tertiary compressional deformation of the Iberian plate. *Terra Nova*, 13: 281-288.
- Casas, A., Aurell, M., Revuelto, C., Calvín, P., Simón, J. L., Pueyo, Ó., Pocoví, A y Marcén, M. (2017): El embalse de Mularroya (Zaragoza): problemas geológicos de una obra en estado avanzado de construcción. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30: 51-64
- Casas, A., Marcén, M., Calvín, P., Gil, A., Román, T., y Pocoví, A. (2016): Deformación varisca, tardi-varisca y alpina en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica: propuesta para diferenciación y denominación de estructuras. *Geo-Temas*, 16:495-498.
- Casas, A., Cortés, A., Gil, A., Maestro, A., Muñoz, A., Pocoví, A., Martínez, B., Oliva, B., Liesa, C., Castillo, E., Pueyo, E., Millán, H., Simón, J.L., Arlegui, L., Aurell, M., Mata, M.P., Tena, S y Román, T. (1995): Estructura y evolución mesozoico-terciaria de las Sierras de Cameros-Demanda (Cordillera Ibérica). *Guía de Campo. VII Reunión de la Comisión de Tectónica de la Sociedad Geológica de España, Univ. Zaragoza.(Logroño, España)*, 113.
- Cortés, A, Casas, A., 1996: Deformación alpina de zócalo y cobertera en el borde norte de la Cordillera Ibérica (Cubeta de Azuara-Sierra de Herrera). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9:51-66.

- Cortés, A., y Casas, A. (2000): ¿Tiene el sistema de fosas de Teruel origen extensional?. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13: 445-470.
- Gutiérrez, F., Gracia, F.J., Gutiérrez, M., Lucha, P., Guerrero, J., Carbonel, D., Galve, J.P. (2012): A review on Quaternary tectonic and nontectonic faults in the central sector of the Iberian Chain, NE Spain/ Fallas cuaternarias tectónicas y gravitacionales en el sector central de la Cordillera Ibérica, NE de España. *Journal of Iberian Geology*, 38: 145-160.
- Gutiérrez, F., Lucha, P., y Jordá, L. (2013): *The Río Grío depression (Iberian Chain, NE Spain). Neotectonic graben vs. fluvial valley*. *Cuaternario y geomorfología*, 27: 5-32
- Hernández, A., Aragonés, M., Aguilar., M., Ramírez del Pozo, J., García , G y Arbizu., M. (1980): *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº 410 (La Almunia de Doña Godina) y memoria*. IGME, Madrid, 40 p.
- Marcén, M. (2014): *Geometría y cinemática de la falla de Río Grío*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza, 56 p. <https://zaguan.unizar.es/record/16299>
- Marcén, M. y Román, T. (2015): Geometría y cinemática de la zona de falla de Río Grío: evidencias de transpresión alpina en la Cadena Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*. 79-82.
- Lafuente, P. (2011): *Tectónica activa y paleosismicidad de la falla de Concud (Cordillera Ibérica central)*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 253p.
- Pereiro, A. (2017): *Estructura y cinemática de zonas de relevo de falla en un contexto de extensión radial: modelización analógica y estudio de casos en el margen oriental de la fosa del Jiloca*. Fin de Máster, Universidad de Zaragoza. 55p. <http://zaguan.unizar.es/record/63653/files/TAZ-TFM-2017-913.pdf>
- Roca, E., y Guimerà, J. (1992): The Neogene structure of the eastern Iberian margin: structural constraints on the crustal evolution of the Valencia trough (western Mediterranean). *Tectonophysics*, 203: 203-218.
- Simón, J.L. (1982): *Compresión y distensión alpinas en la Cadena Ibérica Oriental*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Simón, J.L. (1983): Tectónica y neotectónica del sistema de fosas de Teruel. *Teruel: Revista del Instituto de Estudios Turolenses*, 69: 21–97
- Simón, J. (1989): Late Cenozoic stress field and fracturing in the Iberian Chain and Ebro Basin (Spain). *Journal of Structural Geology*, 11: 285-294.
- Simón, J.L., Arlegui, L. y Liesa, C.L. (2008): Stress partitioning: a practical concept for analysing boundary conditions of brittle deformation. *Geodinamica Acta*, 21/3: 107-115.
- Simón, J.L., Arlegui, L., Lafuente, P. y Liesa, C. (2012): Active extensional faults in the central- Eastern Iberian Chain, Spain. *Journal of Iberian Geology*, 38: 127-144.
- Simón, J. L., Rubio, J. C., y Soriano, M. A. (2010): *Sobre el origen y edad de la depresión del Jiloca (Teruel, Cordillera Ibérica centro-oriental)*. *Geogaceta*, 48: 183-186.