

GEOMETRÍA Y CINEMÁTICA DEL SISTEMA DE CABALGAMIENTOS DE LA SIERRA DE ARCOS (CORDILLERA IBÉRICA)

AUTOR: ANDREA FERRER SERRANO

DIRECTOR: CARLOS LUIS LIESA CARRERA

Índice

1. Resumen/abstract.....	2
2. Introducción.....	3
2. 1. Objetivos.....	2
2. 2. Metodología.....	3
3. Situación geográfica y geológica.....	4
4. Resultados.....	6
4. 1. Análisis de la Macroestructura.....	6
4. 2. Análisis estructural en afloramiento.....	9
4. 2. 1. Cabalgamiento C1.....	9
4. 2. 2. Cabalgamiento C2.....	11
4. 2. 3. Cabalgamiento C3.....	12
4. 2. 3. 1. Afloramiento 3.1.....	12
4. 2. 3. 2. Afloramiento 3.2.....	15
4. 2. 3. 3. Afloramiento 3.3.....	16
4. 2. 4. Cabalgamiento C4.....	17
4. 2. 5. Estructuras extensionales.....	17
4. 2. 5. 1. Fallas normales en el Keuper.....	17
4. 2. 5. 2. Sistema de fallas conjugadas en las unidades terciarias.....	18
5. Discusión.....	20
6. Conclusiones.....	22
7. Bibliografía.....	22

1. Resumen/abstract

Este trabajo presenta el estudio geométrico y cinemático a escala macroestructural y de afloramiento del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos, cerca de la localidad de Ariño (provincia de Teruel) (Cordillera Ibérica). El objetivo de este trabajo es avanzar en el conocimiento geométrico y cinemático del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos y proponer una evolución de los mismos en el contexto de la geología de la cordillera Ibérica. El estudio se ha realizado en una pequeña región al Norte de Ariño, Teruel, y está incluido en el Parque Cultural del Río Martín. La zona se enmarca en el extremo SE de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica que se encuentra limitada por las cuencas del Ebro y del Tajo. El análisis bibliográfico y la información recogida en campo nos han permitido estudiar con detalle la macroestructura y los afloramientos de la zona. El estudio de la macroestructura ha consistido en la realización de la cartografía y los cortes geológicos a escala 1:5000. Por otro lado, el análisis de los afloramientos ha consistido en la realización de esquemas a menor escala y el estudio cinemático por medio de la proyección estereográfica utilizando datos de orientaciones de capas, planos y estrías de falla.

La macroestructura de la zona consta de una serie de cuatro cabalgamientos (C1, C2, C3 y C4), además de las estructuras tectónicas asociadas a los mismos y cuyas orientaciones predominantes son N-S, NW-SE y W-E, además los cortes geológicos realizados muestran la relación de corte entre los diferentes elementos.

Los resultados del análisis en afloramiento han permitido definir la dirección de transporte de los diferentes cabalgamientos siendo NE (NNE) y NNW las predominantes, además también se ha podido dividir la sucesión de los mismos en cuatro fases, dos extensivas y dos compresivas. La primera fase es extensiva y genera fallas normales triásicas, la segunda fase genera los cabalgamientos C1 y C2 y tiene un movimiento predominante hacia el E, la tercera fase genera los cabalgamientos C3 y C4 además de afectar a las anteriores estructuras modificando su dirección de transporte haciendo que sea hacia el NNE y NW. También hay una etapa responsable de la formación de una serie de fallas conjugadas en el cenozoico. Toda esta tectónica se habría producido dentro del contexto de la Orogenia Alpina.

This work presents the geometrical and kinematic studio at the system of thrusts in Sierra de Arcos, near the village Ariño (Teruel) (Iberian Chain). The objective of this work is to advance in the geometrical and cinematic knowledge of the Sierra de Arcos' thrust system and propose the evolution of them in the context of the Iberian Range's geology. The studio has been realized in a little region in the North of Ariño, Teruel, and it's included in the Martin River Cultural Park. The zone is framed in the SE extreme of the Aragonese Branch of the Iberian Range that is limited by the Ebro and Tajo basins. The bibliographic analysis and the field information have permitted to study in detail the macrostructure and the outcrops of the zone. The macrostructure study has consisted in the realization of the cartography and two cross sections at 1:5000. In the other side, the outcrops analysis has consisted in the realization of schemes at minor scale and the cinematic studio using the stereographic projection with data from layer's orientations, planes, and fault striae.

The macrostructure at the zone is formed by four thrusts (C1, C2, C3 and C4) and the tectonic structures associated to them and which orientations are N-S, NW-SE y W-E, moreover the cross sections has allowed us to see the cut-relationship between the different elements.

The results have allowed to define the transport direction of the different thrusts being NE, NNW, NNE the principal ones, moreover It's been possible to divide succession of them in four phases, two extensive and two compressive. The first phase is extensive and it generates triassic normal faults, the second phase generates the C1 and C2 thrusts and it has a predominant movement to the E, the third phase generates the C3 and C4 thrusts, and also affects the previous structures modifying their transport direction going to the NE and NW. Other phase is the responsible of the formation of some conjugate faults in the Cenozoic,. All this tectonics had been produced in the context of the Alpine orogeny.

2. Introducción

2.1. Objetivos

El presente trabajo pretende avanzar en el conocimiento sobre la geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Norte de la Cordillera Ibérica), a partir de cartografías en detalle y el estudio de datos estructurales tomados en campo. A partir de la caracterización del sistema de cabalgamientos se hará la interpretación de los resultados obtenidos en el contexto de la evolución alpina en la Cordillera Ibérica.

2.2. Metodología

La metodología seguida para la realización de este trabajo ha sido:

- Revisión detallada de la bibliografía referente a la zona de estudio en particular y a la Cordillera Ibérica en general en los aspectos referidos a la estratigrafía, estructura y evolución tectónica.
- Estudio de la cartografía geológica a escala 1:50000 del Mapa Geológico Nacional de la hoja nº 467 (Muniesa) (Ríos Aragüés *et al.*, 1981) y, realización de cartografías de detalle a partir de campañas de campo y apoyado con el análisis de ortoimágenes a escala 1:5000 obtenidas del Servicio de Investigación Territorial del Gobierno de Aragón (SITAR).
- Trabajo de campo para la adquisición de datos estructurales tanto de disposición de las capas y de contactos estratigráficos y tectónicos para caracterizar la estructura y geometría general del sistema de cabalgamientos, como de datos cinemáticos en los planos de cabalgamientos principales o en pliegues menores asociados y toma de fotografías de todos los aspectos estudiados.
- Realización de cortes geológicos, generales y de detalle, para caracterizar la geometría general del sistema de cabalgamientos y sus variaciones laterales. La topografía de los mismos se ha realizado a partir del mapa topográfico a escala 1:25000 correspondiente a la hoja nº 467 (Muniesa) (Cartografía Militar de España, Servicio Geográfico del Ejército).
- Análisis en gabinete con la proyección estereográfica de los datos estructurales para interpretar la geometría y cinemática de las distintas estructuras y su evolución. La obtención del eje y del plano axial de los pliegues analizados, se ha realizado mediante la representación de los datos de orientaciones de capas tomados en campo; a partir de sus respectivos polos se obtiene el plano de movimiento, cuyo polo corresponde con el eje del pliegue; el plano axial se deduce a partir del eje y del ángulo entre los flancos del pliegue.

Geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Cordillera Ibérica)

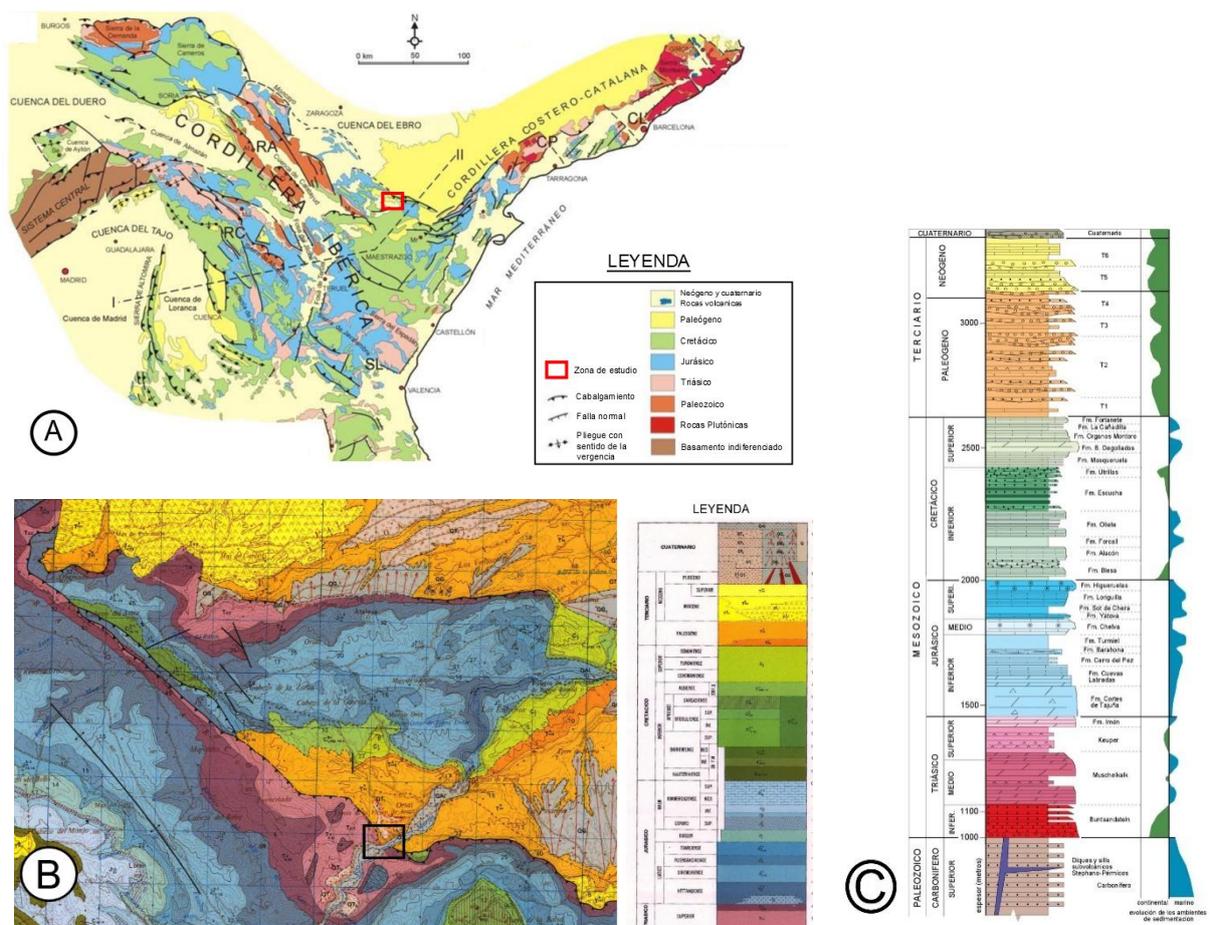
- Elaboración de esta memoria en la que, además de presentar los resultados, se realiza la interpretación general y su discusión en el contexto de la evolución alpina de la Cordillera Ibérica.

3. Situación geográfica y geológica

El área de estudio se sitúa al Noroeste de la provincia de Teruel, al norte de la localidad de Ariño, y se encuentra incluida en el entorno del Parque Cultural del río Martín (Fig. 1).

Esta zona se enmarca en el extremo SE de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (RA, en Fig. 1B). La Cordillera Ibérica es una cadena intracratónica situada entre los dos orógenos alpinos de la Península Ibérica, en el Norte los Pirineos y en el Sur las Cadenas Béticas (Cortes y Casas, 1996). Se extiende desde la meseta hasta el mar Mediterráneo, con una dirección dominante NW-SE. Se encuentra limitada al norte por la cuenca del Ebro y al Oeste por las cuencas del Duero y el Tajo (Aurell *et al.*, 2001).

En la Cordillera Ibérica se pueden distinguir dos periodos de estructuración principales, las orogenias Hercínica y Alpina. La primera da lugar a pliegues y cabalgamientos con direcciones NW-SE y N-S con vergencia hacia el ENE y se encuentra afectando a materiales paleozoicos y precámbricos; se incluyen también deformaciones tardihercínicas (Liesa 1999).



Geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Cordillera Ibérica)

En la segunda, evolución alpina, se produce la sedimentación y estructuración de los materiales mesozoicos así como los del zócalo paleozoico, durante esta segunda etapa compresiva se generan pliegues y cabalgamientos con direcciones NW-SE y E-O y en menor medida NE-SW (Cortes y Casas, 1996), que están condicionados por las estructuras existentes previas variscas. A partir del Mioceno se produce un periodo de tectónica extensional que genera las fosas internas neógenas (Liesa 1999).

Los materiales que afloran en la zona abarcan desde el Triásico hasta el Cuaternario (Figs. 1B, y 1C). La serie estratigráfica estaría compuesta por:

Triásico: se compone principalmente de dos unidades: las Facies Keuper y la Formación Imón.

- La Facies Keuper está formada por arcillas versicolores, que en la base tienen colores grisáceos (Keuper inferior) y hacia techo más rojizos (Keuper superior), y yesos fibrosos y alabastrinos en capas métricas; también cabe destacar la presencia de algunas capas dolomíticas centimétricas, y en ocasiones decimétricas, con laminación algal. La potencia que alcanza varía entre 50 y 100m.
- La Formación Imón está constituida por calizas y dolomías en estratos tabulares de espesor variable que en conjunto forman una sucesión de 15 a 25 metros de espesor, pero que en el sector de estudio pueden alcanzar los 70-80m.

Jurásico: compuesto por un conjunto de unidades en su mayoría carbonatadas, que de base a techo son:

- Formación Cortes de Tajuña, formada por dolomías, brechas dolomíticas y carbonatos con restos de evaporitas.
- Formación Cuevas Labradas, constituida por calizas y dolomías bien estratificadas con intercalaciones ocasionales de margas.
- Formaciones Cerro del Pez, Barahona y Turmiel, la primera y la última caracterizadas por margas y la segunda con carácter carbonatado y bioclástica.
- Formación Chelva, constituida por carbonatos, facies micríticas y grainstones oolíticos.
- Formaciones Yátova, Loriguilla e Higuieruelas, todas ellas formaciones carbonatadas bioclásticas.

Cretácico: aparecen unidades del Cretácico inferior y superior.

- Formaciones Blesa, Alacón, Forcall y Oliete: La Fm. Blesa corresponde a un conjunto litológico muy heterogéneo caracterizado por lutitas, margas, calizas y areniscas. La Fm. Alacón está constituida por una alternancia de margas y calizas bioclásticas. La Fm Forcall, de alto contenido fosilífero, es esencialmente margosa e incluye intercalaciones de calizas hacia techo de la misma. La Fm. Oliete es una alternancia de calizas y margas con intercalaciones ocasionales de areniscas (Casas *et al.*, 1997).
- Formación Escucha: presenta un conjunto de facies muy heterogéneas (lutitas, areniscas, calizas, etc.) y está caracterizada por su gran contenido en lignito, objeto de explotación minera en esta región (Casas *et al.*, 1997).
- El Cretácico superior aparece representado por afloramientos sobre el río Martín caracterizados por calizas.

Cenozoico: En esta región ha sido objeto de estudio de diversos autores entre ellos González (1989) quien establece las unidades tectosedimentarias (unidad T1 y T3) que componen el sector. Las diferentes unidades corresponden al paleógeno y se componen de facies detríticas (conglomerados y areniscas), con escaso desarrollo de las facies químicas.

Cuaternario: Se encuentra en áreas próximas al río Martín y se compone de diferentes unidades de terrazas. Son conglomerados, que pueden estar o no cementados, con areniscas y limos de tonos pardos o amarillo-rojizos, el diámetro de los cantos es variable, como corresponde a estos medios de depósito (Ríos Aragüés et al., 1981)

4. Resultados

4.1. Análisis de la macroestructura

El estudio de la macroestructura de la zona se ha basado en la realización de una cartografía general (Fig. 2) a partir de la revisión de la cartografía del MAGNA (Ríos Aragüés *et al.*, 1981), de las observaciones obtenidas durante el trabajo de campo y del estudio de ortoimágenes a escala 1:5000. A partir de la cartografía y de los datos estructurales recopilados se han elaborado dos cortes geológicos perpendiculares a las distintas estructuras, los cuales permiten caracterizar en profundidad las mismas así como sus cambios laterales (Fig. 3).

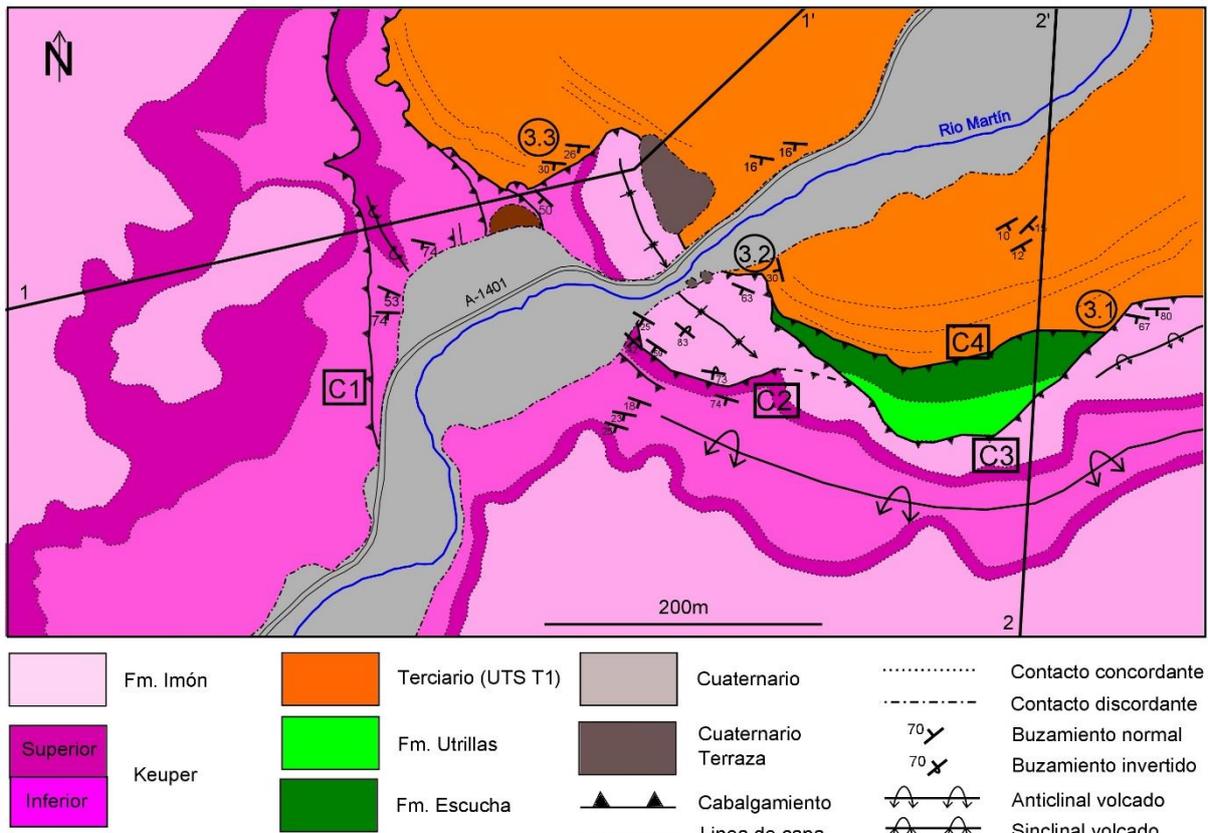


Figura 2. Cartografía geológica de la zona de estudio. Con la localización de los cortes geológicos realizados (1-1' y 2-2'). Los cabalgamientos han sido numerados (C1 a C4) para facilitar la descripción. Las estaciones de toma de datos se encuentran rodeadas y numeradas.

En la cartografía se aprecia que los materiales más antiguos, correspondientes a las facies Keuper, se encuentran en la zona suroccidental; estas facies a su vez se dividen en Keuper inferior, siendo los materiales predominantes, y Keuper superior. La formación Imón es la próxima en aflorar, se diferencian tres áreas; la primera en la parte occidental, la segunda en la zona sur y la tercera aparece en la parte central. Las unidades jurásicas no llegan a aparecer en la zona de estudio debido a que la extensión que esta abarca es pequeña, pero en la cartografía del MAGNA (Ríos Aragüés *et al.*, 1981) afloran al Sur de nuestra zona constituyendo una serie bastante completa con buzamientos moderados al Sur. En cuanto al cretácico solo afloran dos formaciones; la Fm. Escucha y la Fm. Utrillas, el resto de las unidades cretácicas no afloran debido a las condiciones tectónicas y nuevamente a las pequeñas dimensiones de la zona de estudio, estas unidades aparecen representadas en las figuras 2B y 2C. El terciario ocupa toda la parte noreste de la cartografía y está representado por la unidad tectosedimentaria T1 (González 1989). El cuaternario tiene sus afloramientos asociados a la ribera del río Martín y a algunos depósitos de terraza al noroeste de la zona de estudio.

La estructura general de la zona de estudio se divide en cuatro cabalgamientos principales.

El primero (cabalgamiento C1, Fig. 2) se sitúa en la parte suroccidental y tiene una orientación NNW-SSE. En el bloque superior del cabalgamiento afloran el Keuper inferior, superior y la Formación Imón; en el bloque inferior aparecen tanto el Keuper inferior como el Keuper superior, este último se encuentra formando un sinclinal volcado asociado al cabalgamiento. El contacto entre las unidades es en todo momento concordante.

El segundo cabalgamiento (cabalgamiento C2, Fig. 2) está situado en la parte central y tiene una orientación NW-SE, menos norteada que el anterior. Este a su vez está dividido en dos láminas de cabalgamiento, las cuales quedan reflejadas en la figura 2, y que se repiten en los dos márgenes del río Martín. El contacto, al igual que el primero, afecta a las unidades triásicas (Facies Keuper y Fm. Imón). En el bloque inferior del cabalgamiento aparece un sinclinal de orientación NW-SE con inmersión hacia el sureste que afecta a las calizas y dolomías de la Formación Imón. Al Sur, este sinclinal con inmersión aparece cortado por la traza E-W del extremo sureste del cabalgamiento C2.

El tercero (cabalgamiento C3, Fig. 2) es el cabalgamiento de mayor extensión en la zona de estudio y se sitúa en el norte, tiene una orientación general NW-SE, pero a lo largo de toda su longitud esta varía, llegando a tener en ciertas partes orientación W-E. Este contacto pone las unidades triásicas sobre las terciarias en su zona oriental y occidental y sobre las cretácicas en su zona centro (Fig. 2). Al Sureste se observa un anticlinal tumbado asociado al bloque superior del cabalgamiento de orientación W-E. En algunas zonas, el cabalgamiento está tapado por algunos depósitos de terraza.

El cuarto cabalgamiento (cabalgamiento C4, Fig. 2) se sitúa al norte en la cartografía y tiene una orientación aproximada W-E, siguiendo la topografía del valle. La estructura se encuentra cortada en sus extremos por el anterior cabalgamiento, esta relación de corte se puede apreciar en el corte 2-2' de la figura 3. En el bloque superior del cabalgamiento se sitúan las unidades cretácicas, mientras que en el bloque inferior se sitúa el Cenozoico.

La cartografía se encuentra atravesada de SW a NE por los depósitos cuaternarios del río Martín.

Para caracterizar mejor la estructura general de la zona se han realizado dos cortes geológicos. El primero tiene una orientación W-E, y en él, se observan de izquierda a derecha los cabalgamientos

Geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Cordillera Ibérica)

C1, C2, y C3 los cuales posicionan el triásico sobre el terciario; las estructuras de mayor relevancia son los anticlinales de bloque superior que se forman en cada cabalgamiento y los sinclinales, en el Keuper superior y en la Formación Imón. El segundo corte posee una orientación S-N y, de izquierda a derecha, se aprecia, en primer lugar el gran anticlinal tumbado situado en el bloque superior del cabalgamiento C3 que afecta al Triásico; y en segundo lugar, el cabalgamiento C3 que se sitúa por encima del cabalgamiento C4 cortándolo y permitiendo ver la relación de corte entre ambos.

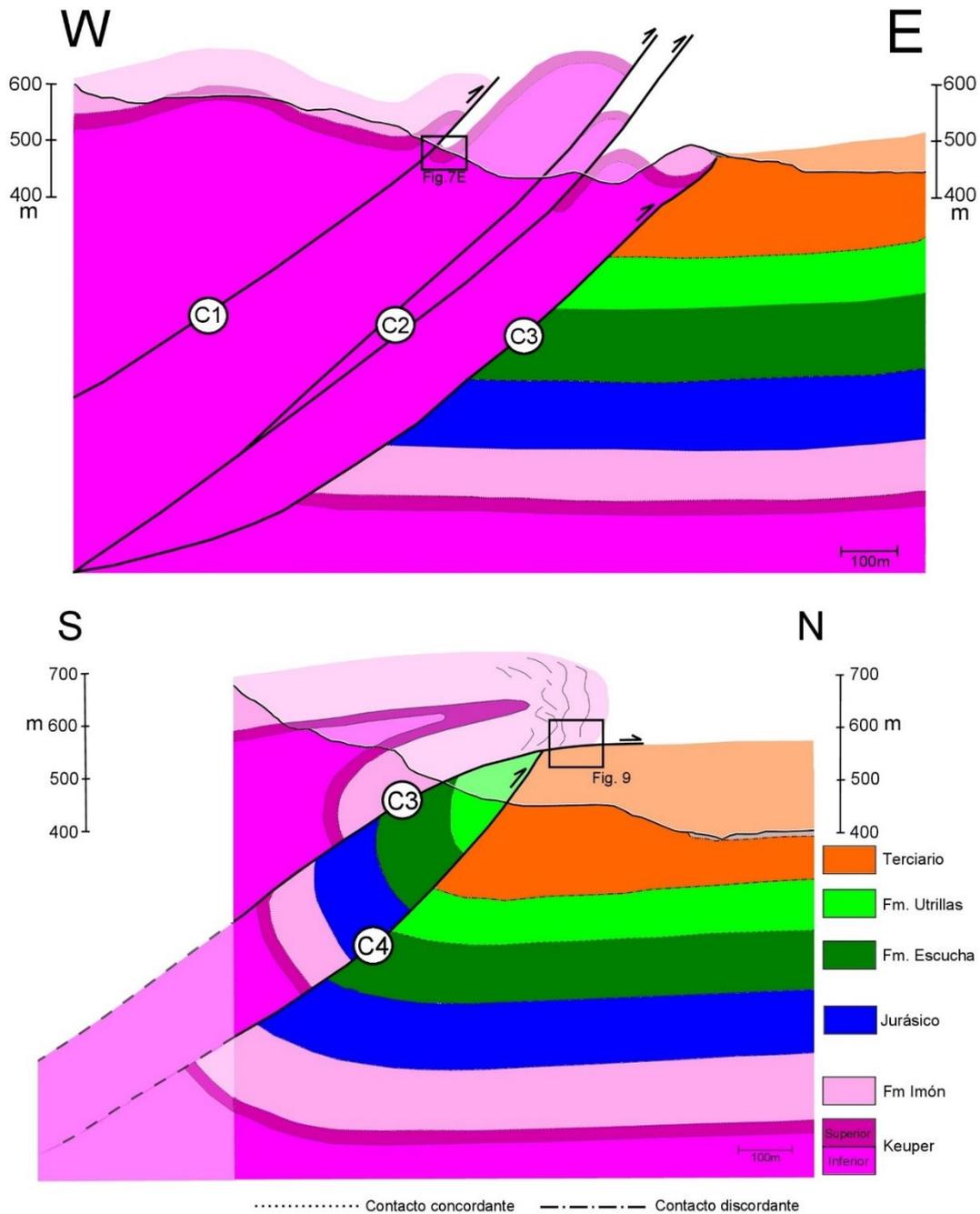


Figura 3. Cortes geológicos realizados a partir de la cartografía a 1:5000. El primer corte es el correspondiente a la traza 1-1' y el segundo el 2-2' indicados en la figura 2. Se ha señalado mediante un recuadro la posición de dos afloramientos estudiados en este trabajo.

4.2. Análisis estructural en afloramiento

El análisis estructural en afloramiento ha estado enfocado principalmente a estudiar la cinemática de los cabalgamientos reconocidos. Es por ello que la presentación de datos va a realizarse siguiendo la numeración de los cabalgamientos realizada en el apartado anterior. Durante los trabajos de campo también se reconocieron dos afloramientos con estructuras extensionales que también fueron estudiadas, pues pueden ayudar a comprender la evolución tectónica de la región.

4.2.1. Cabalgamiento C1

Hacia el Sur de la zona estudiada se sitúa un contacto mecánico que afecta a los materiales de tonos verdes (en rellano de bloque superior) pertenecientes al Keuper (C1, Fig. 2). Se trata de un cabalgamiento que superpone el Keuper inferior sobre el superior, de tonos rojos, que está cortando en rampa, y de modo que las capas presentan buzamiento elevados $70-80^\circ$ al SW y están invertidas (Fig. 4). Debido a las condiciones del afloramiento no se ha podido obtener datos directos del plano de falla principal, aunque es posible conseguir de manera indirecta su orientación aproximada a partir de la cartografía y analizando estructuras a escala de afloramiento. A partir de la cartografía se reconoce que la orientación general del cabalgamiento es N-S ($N170^\circ E$) con un buzamiento de $25-30^\circ$ al W.

De forma más concreta, el afloramiento es un talud paralelo al río Martín, de unos 30 metros de altura y de 500 metros de longitud, que se encuentra al oeste de la carretera de Ariño-Albalate (Fig. 4).

Toda la superficie tiene un alto grado de deformación, y en ella podemos encontrar una gran cantidad de estructuras compresivas. Debido a la extensa envergadura del afloramiento, el estudio se ha llevado a cabo en los puntos A1 y A1' de la figura 4.

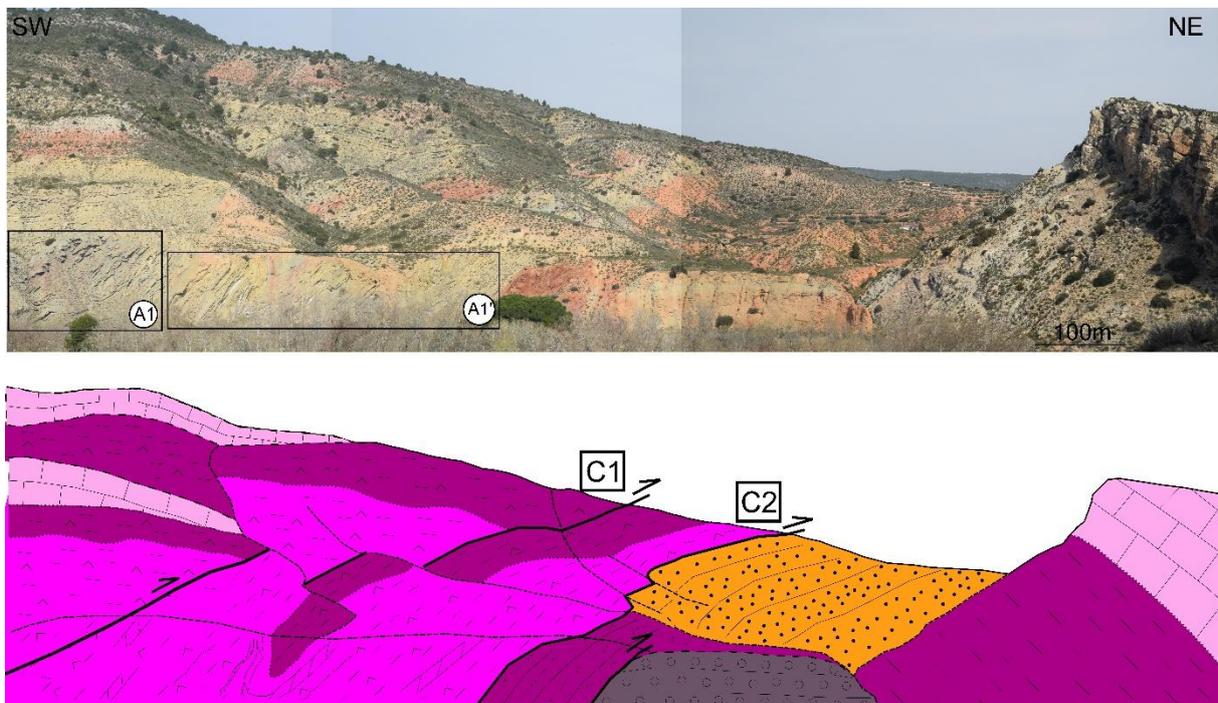


Figura 4. Interpretación en forma de corte del cabalgamiento C1 y posición de los afloramientos a analizar, señalados como A y A' en la figura 2. Nótese la existencia de otros planos de cabalgamiento de menores dimensiones que se corresponderían con el cabalgamiento C2

El primero (A1, Fig. 4) se sitúa en el bloque inferior del cabalgamiento (Fig. 4) y muy próximo a este en el aparecen un conjunto de pliegues de escala métrica que se encuentran separados por diferentes planos de cabalgamiento que, en algún caso, se encuentran deslizados (Fig. 5A). También se han reconocido recrecimientos de yeso asociados a planos de falla menores (Fig. 5B).

Se ha realizado el análisis geométrico y cinemático de uno de estos pliegues, en concreto, el sinclinal volcado vergente al Norte (situado a la izquierda en la figura 5A), la orientación de los elementos

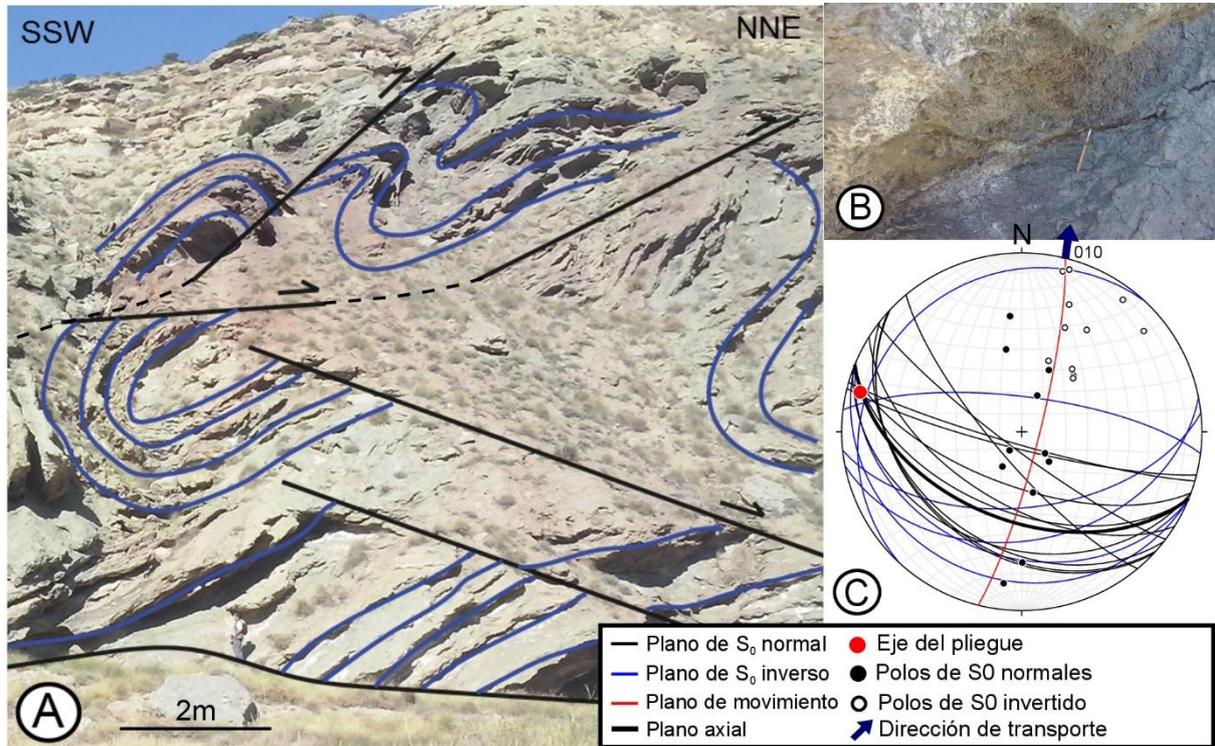


Figura 5. A) Interpretación del afloramiento A1. B) Detalle del crecimiento de cristales de yeso. C) Proyección estereográfica Orientación del pliegue analizado (a la izquierda en la imagen A)

esenciales del pliegue se ha obtenido mediante la proyección estereográfica de modo que las orientaciones obtenidas son: eje del pliegue: 08, 284 y plano axial: 112, 49 S. Si consideramos, como cabe esperar, que la cinemática de este pliegue menor situado en el bloque inferior del cabalgamiento C1 y muy próximo a él, está determinado por la propia cinemática del cabalgamiento podemos deducir una dirección de transporte para este según N010°E, es decir, la dirección del plano de movimiento del pliegue estudiado.

La segunda zona estudiada se señala en las figuras 4 y 5 como A1' y se desarrolla también en el bloque inferior del cabalgamiento C1, pero un poco más alejado que en el caso anterior. En este caso las capas tienen una mayor continuidad y son bastante verticales, la orientación media es N100E con buzamientos que varían entre los 55 y los 75° al Sur y están invertidas (Fig. 6A). La estructura general de este afloramiento no se puede observar al pie del talud, hace falta una panorámica (Fig. 4) para ver la gran amplitud que posee y poder distinguir las estructuras que lo componen. Aunque conforme nos desplazamos paralelamente al talud se pueden ver una gran variedad de estructuras (Fig. 6B, 6C) debido a los límites de extensión de este trabajo solo nos centraremos en las que se han considerado más importantes. De este modo se pueden identificar tres grandes estructuras; en primer lugar y haciendo uso de la figura 6E, se observa que las capas forman un pliegue sinclinal de escala heterométrica, cuyo plano axial, extrapolándolo, corresponde con la orientación aproximada

del cabalgamiento, cabe destacar que el núcleo del sinclinal lo ocupa el Keuper superior. En segundo lugar, se ve que las capas están afectadas por pliegues menores en forma de S en la parte baja del talud (Fig. 6D), lo cual indica si se ha generado una antiforma o una sinforma, siendo esta segunda la

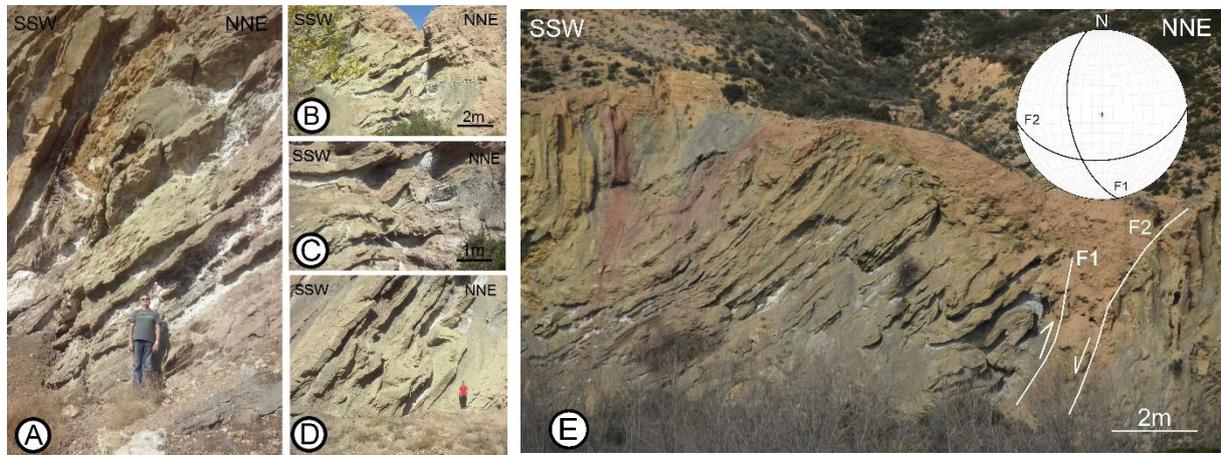


Figura 6. A) Buzamiento de las capas del Keuper en el afloramiento A1'. B) Y C) Detalles de la deformación interna que se observa en todo el talud. D) Detalle de un pliegue tipo S correspondiente al flanco normal del sinclinal. E) Detalle del sinclinal y la zona de falla. Orientación de las fallas.

que se da en este caso. Por último, la tercera estructura de mayor relevancia es una zona de falla de alta deformación caracterizada por grietas rellenas de yeso subparalelas al plano de falla; esta se encuentra delimitada por una falla inversa (F1) y una falla normal (F2) (Fig. 6E).

La mayor parte de estas estructuras descritas se interpretan como compresivas, siendo consecuencia probablemente del movimiento del cabalgamiento C1, ya que todas ellas son coherentes con los datos obtenidos sobre este contacto. Nótese como la orientación de la falla inversa F1 es aproximadamente paralela a la interpolada para el cabalgamiento principal C1.

4. 2. 2. Cabalgamiento C2

Este contacto corresponde con el punto C2 de la figura 2, pero las condiciones del terreno han impedido tomar medidas de orientaciones del plano de falla propiamente dicho. En este caso los materiales del Keuper en su extremo SW, donde el cabalgamiento se orienta E-W; compuestos en su mayor parte por arcillas, yesos y alguna capa dolomítica, con direcciones WNW-ESE y buzamientos suaves de 20 a 25° hacia el Sur; se sitúan por encima de la Formación Imón; compuesta por materiales carbonatados que se presentan en forma de capas tabulares con buzamientos que varían, siendo hacia el oeste más suaves (25 a 40°) e incrementándose hacia el este, entre 70 y 75°, y que además se invierten, deformando el sinclinal NW-SE con inmersión hacia el SE situado a lo largo de la traza del cabalgamiento (Fig. 2).



Figura 7. Cabalgamiento C2, en el que se ponen en contacto la Formación Imón (en la parte superior de la imagen) y las facies Keuper (parte inferior)

Las dos formaciones se ponen en contacto por medio de un cabalgamiento cuya orientación aproximada es WNW-ESE, como se puede observar en la cartografía realizada en la figura 2, mediante un plano poco definido (Fig. 7), además es probable que éste continúe hacia el NE, como se muestra en la cartografía (Fig. 2) donde podría llegar a unirse al cabalgamiento C3, dado que tienen orientaciones similares en el extremo Este.

Las capas del bloque superior podrían poseer una geometría en forma de rampa correspondiente a los pliegues asociados a cabalgamientos, pero las relaciones geométricas no han sido posibles de observar en campo.

4. 2. 3. Cabalgamiento C3

Como se puede observar en la cartografía (Fig. 2) el cabalgamiento C3 recorre gran parte de la zona estudiada. Debido a la gran extensión que abarca el contacto, se han realizado observaciones cinemáticas en tres puntos o afloramientos (Fig. 2): afloramientos respectivos 3.1, 3.2 y 3.3.

4. 2. 3. 1. Afloramiento 3.1

El primer afloramiento que se estudia en relación con el cabalgamiento C3 se sitúa en la parte más oriental de la zona estudiada (3.1, Fig. 2). Los materiales implicados son las dolomías de la Fm. Imón que se superponen al Cenozoico, compuesto por areniscas y arcillas. Se corresponde con el frente de cabalgamiento principal y el plano de cabalgamiento muestra un suave buzamiento al Sur (Fig. 8).

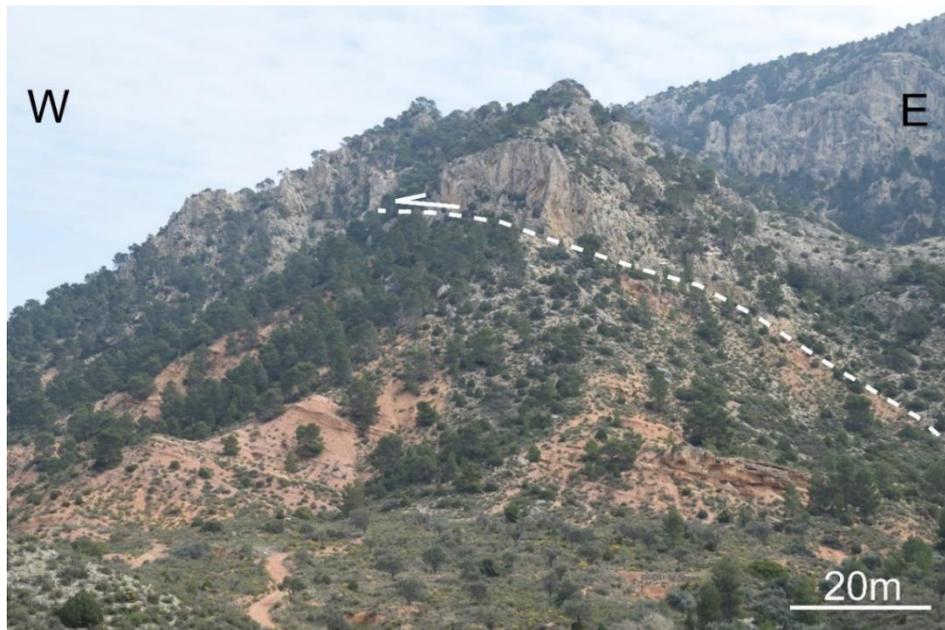


Figura 8. Frente del cabalgamiento C3, el anticlinal de bloque superior compuesto por la Fm. Imóny se sitúa encima de los materiales cenozoicos

La Formación Imón tiene una disposición subvertical, que en ocasiones se invierte y forma pliegues de escala métrica, y posee una geometría en rampa. El terciario del bloque superior buza suavemente hacia el Sur, pero si nos desplazamos hacia el Sur por la zona, este tiende a ganar buzamiento; además, su geometría es de rellano. Esta disposición sugiere que la Formación Imón representa el flanco frontal, a veces invertido, del anticlinal de bloque superior del cabalgamiento, hecho que se reconoce tanto en la ortoimagen como en la cartografía realizada.

En este afloramiento se han tomado tres estaciones principales de medidas de estructuras que se describen a continuación.

Estación 1: Compuesta por una zona con pliegues suaves: se han medido diferentes planos de estratificación (S_0); en alguno de estos planos se aprecian estrías de deslizamiento capa sobre capa. Localmente se observa algún plano de falla menor con estrías. De los datos recopilados representados en proyección estereográfica se deduce que el plano axial del pliegue tiene una orientación 088, 83S y el eje 07, 088. Atendiendo al plano de movimiento del pliegue, la dirección de transporte tectónico indicada es hacia el N (N357°E).

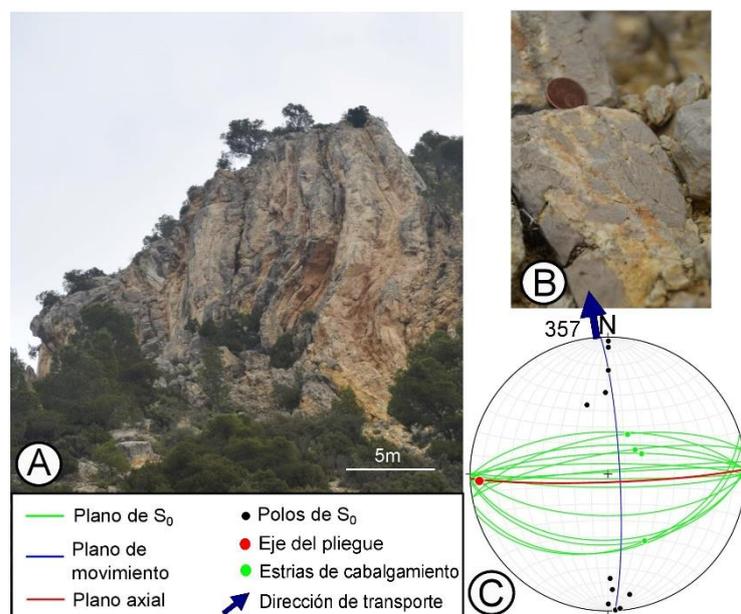


Figura 9. A) Estación 1: pliegues suaves en el frente de cabalgamiento. B) Detalle de uno de los planos con deslizamiento capa sobre capa. C) Representación estereográfica de los datos obtenidos en campo

Estación 2: Plano de estratificación con estrías muy desarrolladas, capa sobre capa: es un plano de falla menor que “despega” del plano de falla principal. Se reconocen varias familias de estrías con un cabeceo bastante parecido y en ciertas zonas de la superficie de la falla se encuentran escalones de recristalización de calcita. La relación de corte entre las familias de estrías ha permitido determinar una secuencia de movimiento en la que las estrías con cabeceo cercano a 90 son las que establecen el primer movimiento, mientras que las de menor cabeceo (78°) son las segundas en desarrollarse. De acuerdo con las estrías estudiadas se distinguen dos direcciones de transporte, la primera hacia el NE (N010°E) y la segunda hacia el NW (N355°E).

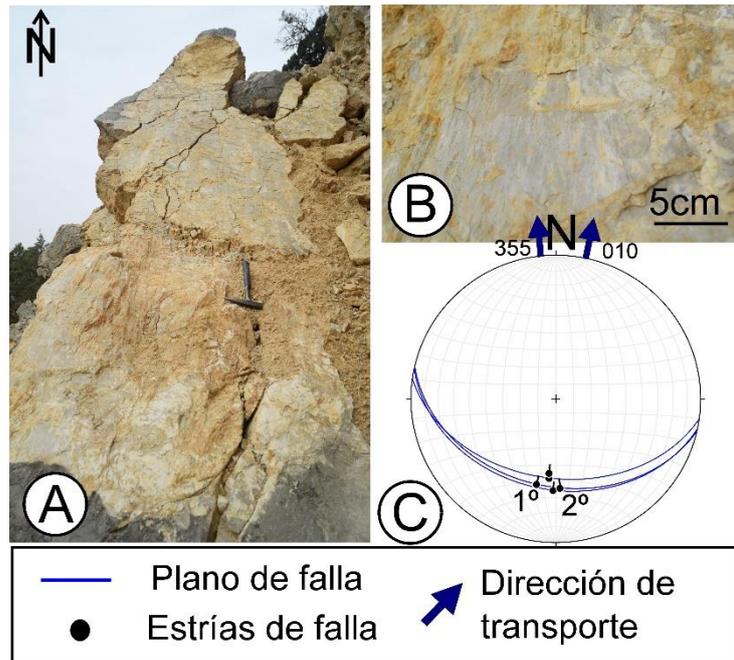


Figura 10. A) Estación 2: Plano de estratificación. B) Detalle de las familias de estrías que se han desarrollado. C) Representación estereográfica de los datos obtenidos

Estación 3: Plano principal de cabalgamiento: hacia el Sur en el mismo afloramiento se ha obtenido el plano principal del cabalgamiento. Afecta (como se ha comentado previamente) a las capas invertidas de la Formación Imón en geometría de rampa de bloque superior, las cuales se sitúan sobre las areniscas y arcillas del Terciario que tienen una geometría de rellano de bloque inferior. Entre estas dos unidades se observa una zona de brecha de falla en la que aparecen varios planos de falla con estrías. La dirección de transporte que se deduce a partir de las estrías indicadas es hacia el NE (N023°E).

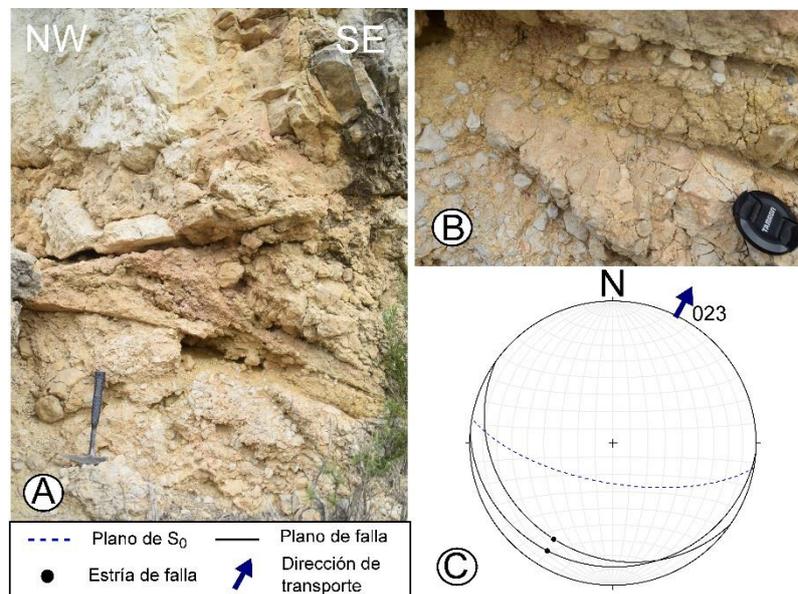


Figura 11. A) Estación 3: Plano principal de cabalgamiento. B) Detalle del desarrollo de estrías sobre el plano de cabalgamiento. C) Representación estereográfica del plano de cabalgamiento y estrías.

4. 2. 3. 2. Afloramiento 3.2

El siguiente punto a estudiar se sitúa en la parte centro-oriental de la cartografía (3.2, Fig. 2). Se observa como el cabalgamiento superpone la Fm. Imón sobre los materiales cenozoicos. En este caso, las capas triásicas se encuentran formando un sinclinal NNW-SSE que se encuentra seccionado por el río Martín (ver figura 2) y que tiene una inmersión hacia el Sur. Por otro lado el Cenozoico se compone de capas, en ocasiones bastante potentes, de areniscas y arcillas con un suave buzamiento hacia el Sur.

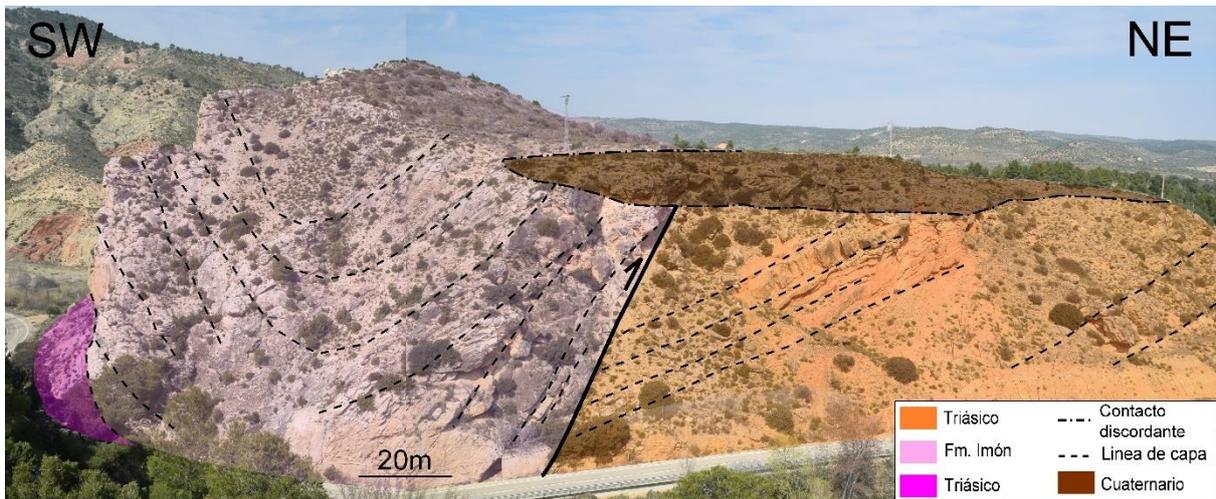


Figura 12. Esquema en el que se muestra el cabalgamiento C3 al margen E del río Martín. En él se aprecia la geometría de sinclinal de la Fm. Imón (a la izquierda), el Cenozoico (derecha) y como la terraza cuaternaria fosiliza el cabalgamiento.

Este contacto se ha observado en dos afloramientos, uno situado en el margen W del río y el otro al E.

En el primero, no se reconoció el plano principal del cabalgamiento, ya que estaba tapado por derrubios de ladera, aunque sí se pudo realizar un esquema del afloramiento en el que se ven las relaciones de corte entre las distintas unidades y la falla (Fig. 12). También se aprecia una de las terrazas del río que, como se ha comentado en el apartado de macroestructura, no permite observar el cabalgamiento en superficie y fosiliza el plano de cabalgamiento.

En el segundo afloramiento se ha reconocido la misma estructura, las dolomías de Imón situadas por encima de las arcillas, algún nivel de yeso y areniscas del Terciario (Fig. 13). Se han diferenciado dos planos de cabalgamiento, uno que separa las dolomías (muy fragmentadas) del bloque superior, de las arcillas, que tienen geometría alabeada; y otro que se sitúa muy próximo al anterior (menos de 2m de distancia), que es paralelo tanto a la estratificación del terciario como al plano antes descrito y que posee evidencias de haber sufrido un movimiento inverso. Estas evidencias se reconocen especialmente en una parte de dicho plano y consisten en el desarrollo de estructuras S-C que afectan a las arcillas.

La falla inversa descrita en primer lugar (1, Fig. 13) tiene orientaciones medias NNW-SSE, con un buzamiento medio de 35-40° hacia el W. El segundo plano (2, Fig. 13) posee una orientación media de N165°E con un buzamiento un poco menor que el plano anterior (25°) al W; es en este plano donde se aprecian las estructuras S-C (Fig. 13B).

A partir de los datos recopilados, se ha realizado el análisis cinemático mediante proyección estereográfica de los mismos (ver figura 13C) teniendo como objetivo la obtención de la dirección de transporte del cabalgamiento principal. De este modo se ha deducido que el cabalgamiento tuvo un desplazamiento hacia el NE (N043°E).

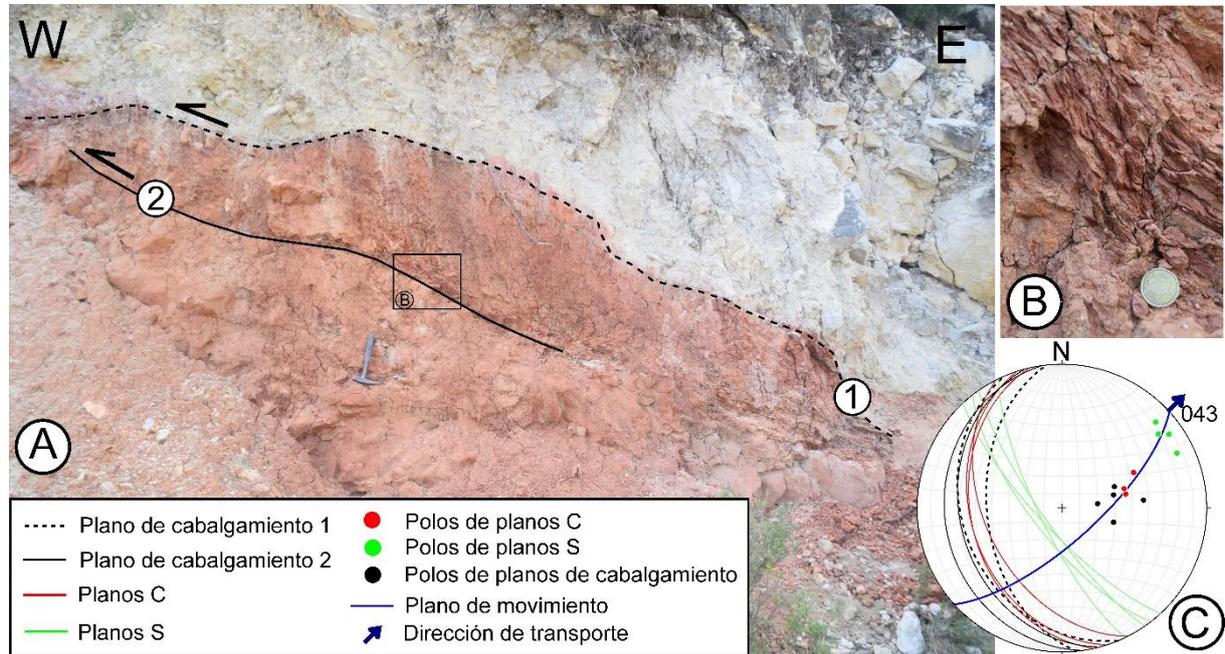


Figura 13: A) Interpretación de los planos de cabalgamiento. La zona de estructuras S-C está señalado mediante un recuadro. B) Foto de detalle de las estructuras S-C. C) Proyección estereográfica del conjunto de los datos.

4. 2. 3. 3. Afloramiento 3. 3

Este afloramiento se sitúa en la parte occidental del cabalgamiento C3 (3.3, Fig. 2). No se ha podido estudiar el plano del cabalgamiento, ya que las condiciones del terreno no lo permitían. De forma indirecta se observa que la falla pone los materiales del triásico inferior sobre los materiales

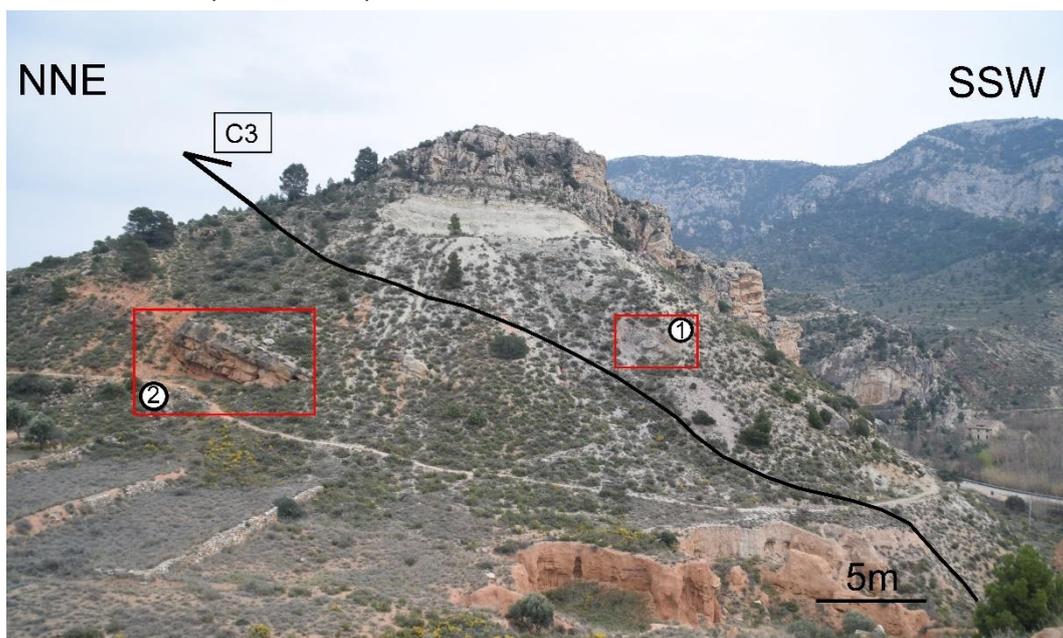
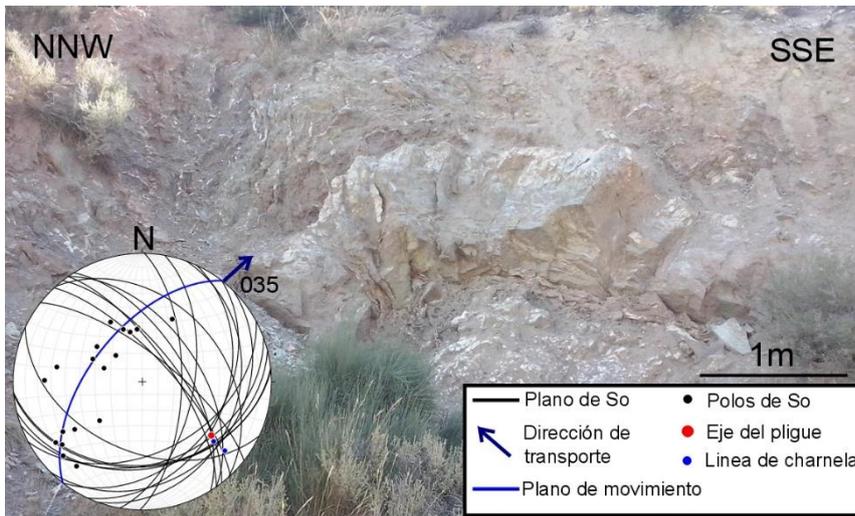


Figura 14: Interpretación del plano de cabalgamiento. 1) Pliegue menor en el bloque superior. 2) Sistema de fallas conjugadas cenozoicas

cenozoicos. El triásico inferior se encuentra buzando entre 30 y 40° hacia el Sur y con orientaciones N-S en algunos puntos y en otros NO-SE; mientras que el terciario tiene una orientación media de N095°E y buzamientos de 30° hacia el Sur. El contacto por otro lado posee una orientación NNW-SSE con un buzamiento medio que es algo más elevado al de las capas triásicas, como se puede observar en la figura 14 y en la cartografía de la Fig. 2.

Se ha analizado la geometría y cinemática de un pliegue menor perteneciente al bloque superior del cabalgamiento (punto 1, Fig. 14). El pliegue se compone de los materiales propios del Keuper, dentro



de los cuales las capas dolomíticas son las encargadas de darle forma, y es de dimensiones métricas. Se trata de un pliegue asimétrico con vergencia hacia el NNE, en el que un flanco buza paralelamente al buzamiento del plano de cabalgamiento y el otro flanco buza perpendicularmente al mismo; y la geometría es de rampa sobre rellano. Se han

Figura 15. Análisis en proyección estereográfica del pliegue, se observa el vector de desplazamiento del mismo

tomado medidas de estratificación abarcando toda la estructura, además de dos líneas de charnela y se ha realizado el análisis mediante proyección estereográfica de los datos obtenidos (Fig.15). La interpretación de la cinemática nos permite deducir que la dirección de transporte del cabalgamiento sería aproximadamente hacia el NE (N035°E), y viene dado por la orientación del plano de movimiento del plano. También se señala el eje del pliegue cuya orientación es 33, 128.

4. 2. 4. Cabalgamiento C4

El cabalgamiento C4, descrito de forma general en el apartado de macroestructura no se va a analizar con afloramientos, debido a que el terreno y las condiciones del mismo no aportaban datos relevantes para este trabajo.

4. 2. 5. Estructuras extensionales

Se han estudiado dos afloramientos con estructuras extensionales, una en los materiales margoyesíferos y dolomíticos del Keuper y otro en las areniscas y conglomerados paleógenos.

4. 2. 5. 1. Fallas normales en el Keuper

Este afloramiento de materiales pertenecientes al Keuper se sitúa unos cientos de metros al W del punto C2 señalado en la cartografía de la figura 2. Se trata de dolomías y arcillas de color verdoso afectadas por estructuras extensionales. La estratificación de las capas tiene una orientación media WNW-ESE (N100°E) con buzamientos de 20° S (Fig. 16).

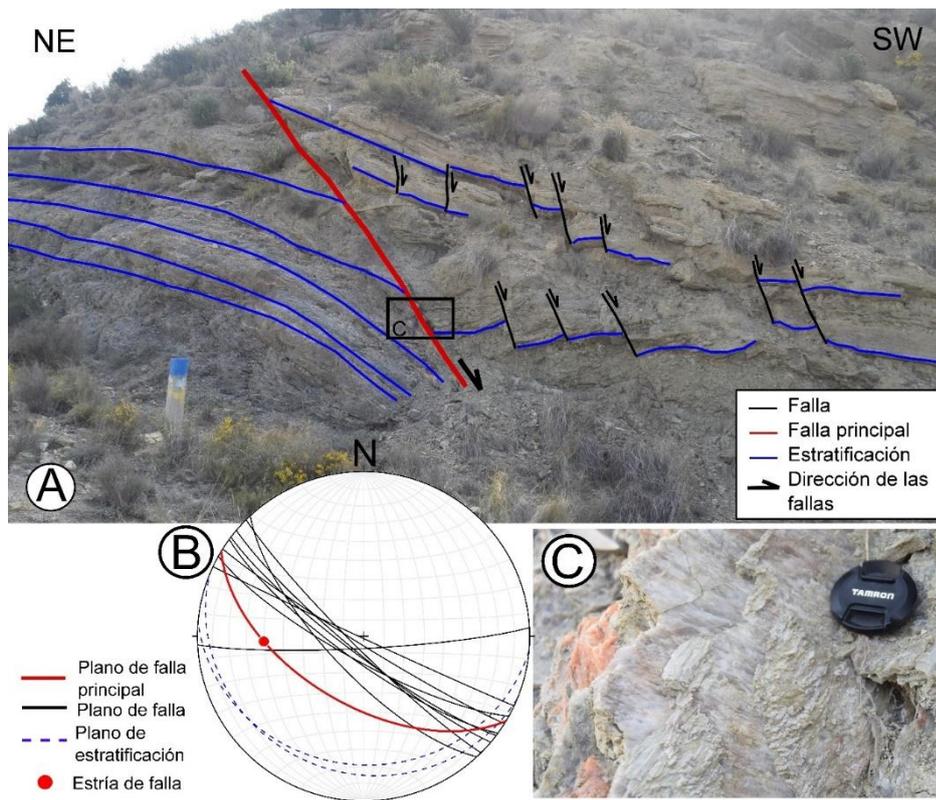


Figura 16. A) Interpretación del conjunto de fallas normales. B) Representación de las orientaciones de las diferentes estructuras C) Detalle de los recrecimientos de yeso en el plano de falla principal

En el afloramiento destaca una falla principal con un desplazamiento de escala métrica-decamétrica, y una serie de fallas de menor tamaño con desplazamiento menor, variando desde centimétrico (5-8cm) a decimétrico. La orientación media que presentan es NW-SE (N130°E); el buzamiento de la falla principal es de 56° hacia el Sur, mientras que las fallas menores tienen mayor buzamiento (70-89° al SW) (Fig. 16A y B). En la falla principal se observa un recrecimiento de cristales de yeso con dos direcciones predominantes y una familia de estrías con cabeceo 40W (Fig. 16C) pero no se reconoció el sentido de movimiento.

En las capas del bloque superior se puede observar una geometría en cuña (Fig. 16A) abierta hacia la falla principal que indica que la sedimentación se dio al mismo tiempo que se producía el movimiento de la falla, es decir, que se trata de fallas normales sinsedimentarias. Las capas más altas de materiales situados en el bloque superior de la falla principal presentan una geometría típica de pliegues de arrastre, es decir tienden a hacerse paralelas con el plano de la falla. Todas las fallas que componen el afloramiento son normales e indican una extensión SW-NE.

4. 2. 5. 2. Sistema de fallas conjugadas en las unidades terciarias

En un talud en el noroeste de la zona de estudio, a los pies del sendero de la ermita de la Virgen de Arcos (punto 1, Fig. 14), afloran capas de areniscas y conglomerados cenozoicos con orientación N095°E y buzamientos medios de 25-30° al Sur (Fig. 2A), que están afectados por un conjunto de fallas.

Geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Cordillera Ibérica)

Las fallas que se observan tienen una longitud mayor hacia el noroeste (izquierda, Fig. 17B) siendo estas de varios metros, las situadas hacia el noreste tienen menor longitud (generalmente métricas), aunque hay más cantidad de las mismas. El desplazamiento que generan estas fallas en cambio es relativamente pequeño, siendo de pocos centímetros (se ha encontrado una fractura con un desplazamiento de 60 cm); es posible verlo en la imagen situada a la derecha en la figura 17B; los

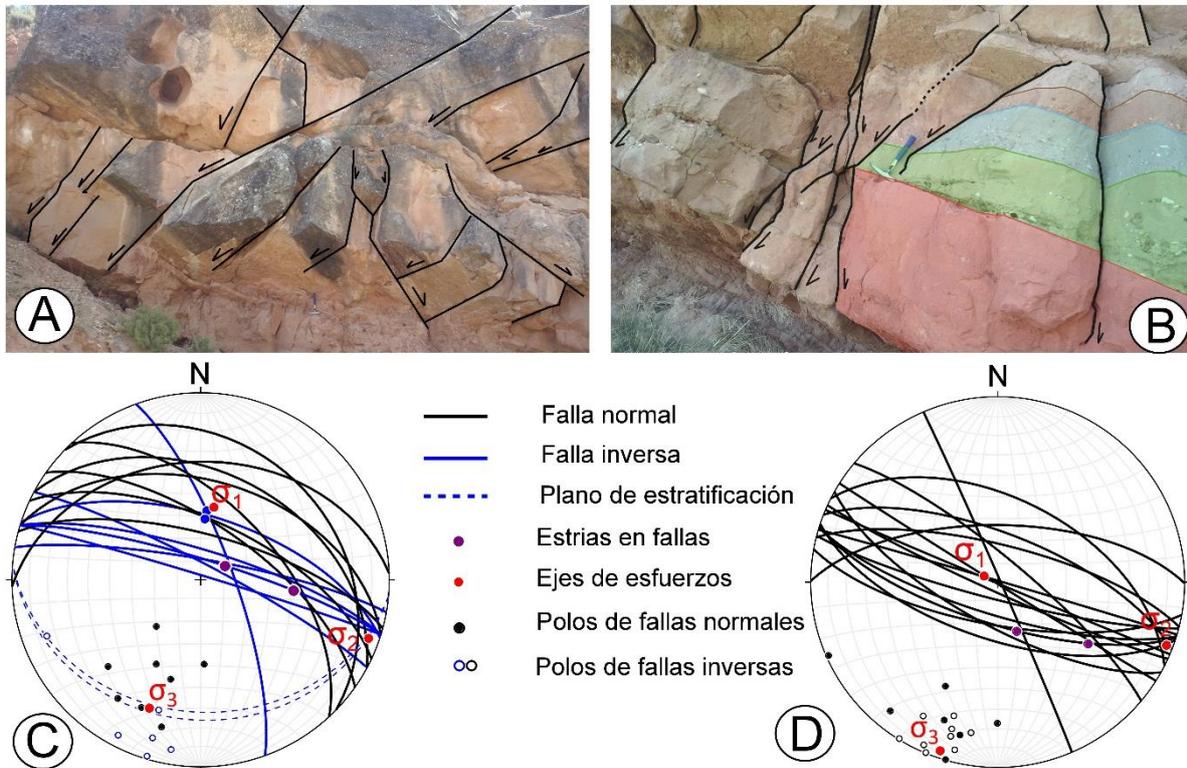


Figura 17. A) y B) Esquema e interpretación de las fallas en el afloramiento. C) Representación estereográfica de las estructuras medidas en campo, orientaciones previas a ser restituidas y posición de los ejes de esfuerzos. D) Representación de las orientaciones de las fallas y posición de los ejes de esfuerzos en el sistema de fallas normales conjugadas una vez abatida la estratificación.

marcadores en este caso son unas estructuras lineales dentro del estrato de arenisca (límites en las zonas de colores rojo, verde azul y marrón en la figura 17B) compuestas por cantos de tamaños centimétricos.

La orientación media de las fallas es WNW-ESE (W110°E) y se pueden distinguir dos familias diferenciadas según su buzamiento (Fig. 17C). La primera de ellas posee un buzamiento 70-80° al N y sentido de movimiento inverso y la segunda, sin embargo, tiene buzamientos menores que van de 30 a 50° al N (Fig.17B) y sentido de movimiento normal. Se han tomado datos de 17 planos de falla que han sido representados en proyección estereográfica junto con varios datos de estratificación del Cenozoico en ese punto.

El estereograma, junto con la geometría y la disposición de las fracturas observadas en campo, sugiere que se trata de un sistema de fallas conjugadas posteriormente basculadas junto con la estratificación. Si aplicamos el modelo de Anderson (1951) para la caracterización de fallas normales conjugadas, se pueden determinar cuáles son las posiciones de los ejes de esfuerzo relativos al sistema estudiado (Fig. 17C). La orientación de σ_1 es subvertical y está ligeramente inclinado hacia el este, debido a que todo el afloramiento se encuentra basculado. Para restituir el basculamiento se

han abatido los datos en proyección estereográfica (Fig. 17D). El sistema una vez restituido indicaría una dirección de extensión (σ_3) 05, 200.

5. Discusión

El análisis geométrico y cinemático del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos, tanto de la cartografía como de los afloramientos estudiados, conducen a una serie de resultados los cuales se exponen a continuación.

El estudio de la cartografía en detalle, a escala 1:5000, permite observar ciertas diferencias con respecto a la cartografía del mapa geológico de España a escala 1:50000 (Rios Aragües *et al.*, 1981) y, trabajos realizados por otros autores como (Casas *et al.*, 1997; Aurell Cardona *et al.*, 2001). En estos, solo se ha representado el frente de cabalgamiento que corresponde al cabalgamiento C3 de este trabajo; mientras que el resto de cabalgamientos o no están representados o aparecen como una discordancia. Esto puede ser debido a la utilización de una escala más detallada por nuestra parte en la que se pueden representar de mejor manera los cabalgamientos que afectan al triásico (C1 y C2, que son los que faltan en los demás trabajos), ya que el límite entre el triásico superior e inferior esta poco definido (solo es diferenciable mediante el color); esto explicaría también, que se haya representado como una discordancia en algunas publicaciones.

Atendiendo a la geometría de los cabalgamientos y estructuras descritos en la cartografía (Fig. 2), se distinguen dos orientaciones; NW-SE, N-S (NNW-SSE en algunas estructuras) y W-E. Los cabalgamientos C3 y C4 tienen una orientación general NW-SE y W-E, aunque su traza es muy variable; el anticlinal situado al Sur de estos dos cabalgamientos está orientado de igual manera, lo cual sugiere que se formó como consecuencia de estos. Por otra parte, el cabalgamiento C1 y el C2 poseen una traza mucho más norteada que los anteriores además se estructuras compresivas asociadas con la misma orientación.

Por otro lado, el estudio cinemático de los afloramientos, han permitido deducir la dirección de transporte de los cabalgamientos descritos previamente, y proponer una sucesión de eventos o fases deformacionales.

Las direcciones de transporte se han inferido a través de datos cinemáticos indirectos obtenidos a partir del estudio de pliegues asociados a los cabalgamientos y la toma de datos directa sobre el terreno; si representamos todas las direcciones de transporte en una rosa de direcciones (Fig. 18) se deducen dos direcciones principales: NW y NE.

La dirección de transporte hacia el NE afectaría a los cabalgamientos C1 y C2 principalmente, así como a todas las estructuras asociadas a los mismos (véase los dos sinclinales representados en la cartografía de la figura 2); la dirección de transporte hacia el NW afectaría a todo el conjunto de estructuras y cabalgamientos. En el caso de los cabalgamientos C1 y C2, aunque la dirección de transporte que aparece en los resultados es NE, se interpreta que previamente pudieron tener una dirección hacia el ENE ya que así lo indica la orientación de la traza de los mismos (como son trazas N-S el desplazamiento tuvo que ser más o menos perpendicular).

Geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Cordillera Ibérica)

La orientación de las estructuras (N-S y NW-SE) así como los materiales a los que están afectando (mesozoicos y cenozoicos) y las direcciones de transporte obtenidas indican que se habrían formado durante la orogenia alpina. El orden de sucesión de las diferentes etapas se ha deducido mediante el estudio de las relaciones de corte entre las estructuras principales, estas se hacen evidentes al observar la relación entre el sinclinal del afloramiento 3.2 y el cabalgamiento C2 en la figura 18. En ella se ve como el cabalgamiento C2 tiende a cortar el sinclinal en su extremo oriental, esto nos permite determinar dos etapas de compresión cuyas direcciones de desplazamiento serían, en primer lugar NE y en segundo lugar NW. Este orden en las direcciones de transporte se observa con claridad también en el afloramiento 3.1 (Fig. 10), en cuyo caso las estrías del plano de cabalgamiento son las que apoyarían estas observaciones.

Los eventos o fases deformacionales compresivas que se proponen se dividen en dos, así como dos fases de menor desarrollo extensivas.

Previamente a la estructuración compresiva, se generan las fallas normales triásicas (afloramiento de la figura 16) señalando de este modo una primera etapa extensiva y siendo además el momento en el que se depositan los materiales de la misma edad, ya que se interpretan como sinsedimentarias como se ha explicado previamente.

Seguidamente se produce una compresión durante la cual se forman los cabalgamientos C1 y C2, cuya orientación es N-S, con un movimiento hacia el Este; en los cortes geológicos realizados solo se observa que afecte a las unidades triásicas, aunque posiblemente afecten a toda la serie estratigráfica más moderna, la cual aparece en la zona occidental en la cartografía del mapa geológico de España a escala 1:50000 (Rios Aragües *et al*, 1981).

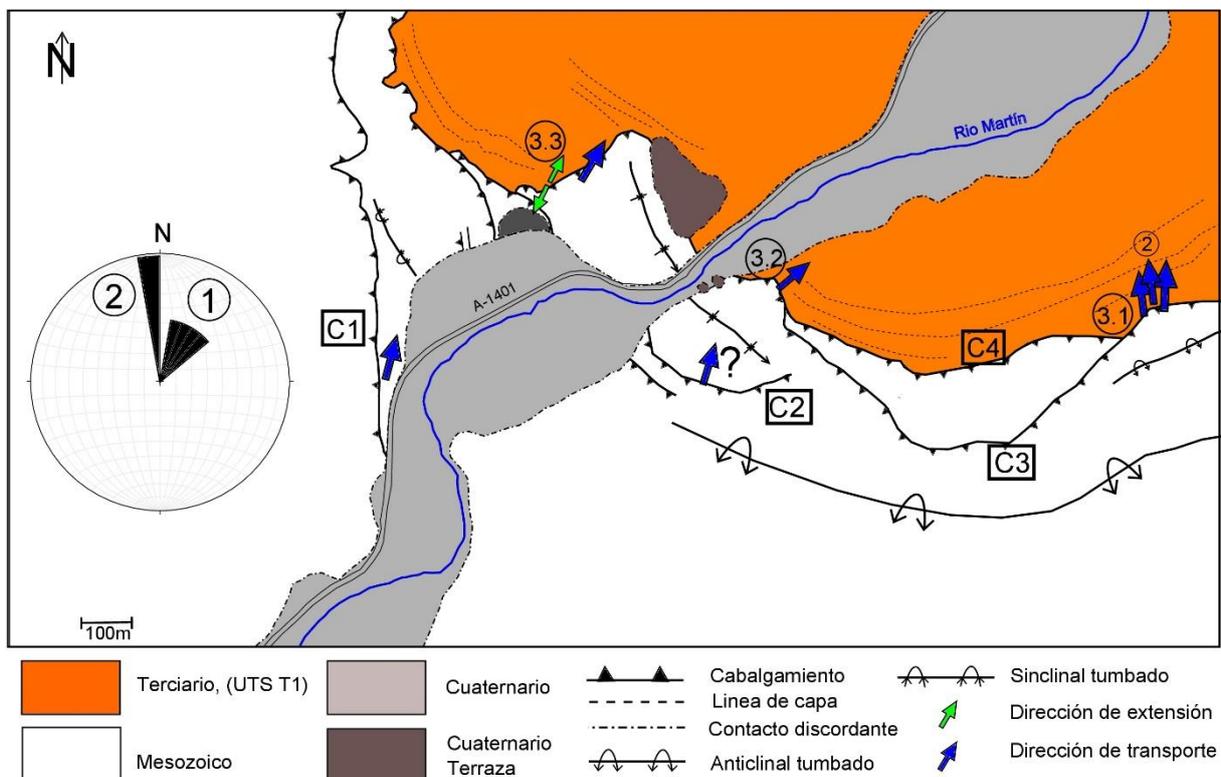


Figura 18. Interpretación de las direcciones de transporte de los cabalgamientos estudiados y rosa de direcciones en la que se muestra el orden de las etapas de deformación. Se incluye la dirección de extensión en el cenozoico

La segunda etapa compresiva viene dada por una compresión hacia el Norte que genera los cabalgamientos C4, en primer lugar, y C3 posteriormente, este orden de formación se observa en el corte geológico 2-2' de la figura 3, donde el cabalgamiento C3 corta al C4 casi perpendicularmente y debido a ello las unidades aflorantes cretácicas quedan limitadas entre ambas estructuras; además se generan los pliegues asociados al cabalgamiento C3 (Fig. 9); por otro lado, los cabalgamientos C1 y C2 sufren una reactivación que les hace desplazarse coherentemente al resto de estructuras, es decir pasan de tener un transporte hacia el E a desplazarse hacia el NNE.

Durante el cenozoico, se produce una etapa extensiva observada en este trabajo, y se aprecia en el afloramiento de fallas conjugadas (punto 1, Fig. 14), aunque con los datos recopilados no ha sido posible determinar el momento de su formación, lo que sí es posible decir es que posteriormente sufrirán un basculamiento que afectara a todo su conjunto.

Finalmente nombrar que durante la etapa correspondiente al Cuaternario se generan los depósitos de terraza del Río Martín, así como los depósitos de ribera, que se encajan en el relieve anteriormente formado dando lugar a la topografía que tenemos hoy en día.

6. Conclusions

The results obtain using the data from the macrostructure and the outcrops have allowed us to get some conclusions.

The first one is that despite of the cartographies done by other authors, we can distinguish four more thrusts in the Sierra de Arcos zone, due to the different scale and the details of this work.

This thrusts have had different transport directions over time, and they are related to two stages of compressive movement. The first stage generates the thrusts C1 and C2 and it implies a transport direction to the E; the second stage generates the thrusts C3 and C4 and also changes the transport direction of the previous thrusts so the final movement is to the NE and NW.

There are also two outcrops that indicates the existence of two extensive stages, the one that formed normal faults in Triassic materials is before the formation of thrust C1, the one that affects Cenozoic materials is the second extensive stage and it generates normal conjugate faults that are tilted later.

In conclusion, we distinguish four movement stages: two compressive and two extensive, all of them are included in the Alpine orogeny of the Iberian range.

7. Bibliografía

Anderson, E. M. (1951): *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Brittan, Edinburgh*, Oliver and Boyd.

Aurell, M., Bádenas, B., Casas, A. M. y Alberto, S. (2001): *La geología del Parque Cultural del Río Martín*. Asociación Parque Cultural del río Martín, Zaragoza, 171 pp.

Geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos de la Sierra de Arcos (Cordillera Ibérica)

Casas, A. M., Cortes, A. L., Liesa, C. L., Meléndez, A. y Soria, A. R. (1997): Estructura del borde N. de la Cordillera Ibérica entre la Sierra de Arcos y el anticlinal de Montalbán. En: *Cuadernos de geología ibérica*, nº23. (Servicio de Publicaciones, eds.). Universidad Complutense, Madrid, 243-268.

Casas, A. M. (1986): Evolución tectónica de un sector del borde N. de la Cadena Ibérica: *Revista del Instituto de Estudios Turoleses*: (9-25)

Cortes García, A. L. y Casas Sainz, A. M. (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 (1-2): 51-66

González, A. (1989): *Análisis tectosedimentario del Terciario del borde sur de la depresión del Ebro (sector bajo-aragonés) y de las cubetas ibéricas marginales*, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 507 pp.

Liesa, C. L. (1999): *Fracturación y campos de esfuerzos compresivos alpinos en la Cordillera Ibérica y el NE peninsular*, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza 583 pp.

Ríos Aragüés, L. M., Beltrán Cabrera, F. J., Lanaja del Busto, J. M. (1981): *Mapa Geológico de España a escala 1:50000 de la hoja nº 467 (Muniesa) y memoria*. Instituto Geológico y Minero de España, 25pp.

Servicio Geográfico del Ejército: *Mapa Topográfico de España a escala 1:25000 de la hoja nº 28-18 (467) (Muniesa)*. Cartografía Militar de España.

Sopeña, A. (2004): "Cordillera Ibérica y Costero-Catalana". En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 465-527