

## Tesis Doctoral:

# Estudio geológico de la vertiente sur del Pirineo oriental y central Evolución cinemática en 3D

JAUME VERGÉS I MASIP

Grup de Geodinàmica i anàlisi de conques, Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia. Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08071 Barcelona. E-mail: jaumev@natura.geo.ub.es

### ABSTRACT

#### **Geological study of the southeastern and southcentral side of the Pyrenees. 3D kinematic evolution.**

The oblique Segre ramp zone between the eastern and central Pyrenees represented one of the major unsolved problems on the southern side of the Pyrenees. Here, the understanding of its geometry and evolution not only explains the eastern boundary of the South Central Unit but also represents an advanced step for the comprehension of the whole evolution of the southern Pyrenees (Fig. 1).

A network of 15 seismically supported perpendicular cross-sections is presented in this study. Some of them have been balanced and restored, and thus allow shortening calculations. Cross-cutting relationships between structures and syntectonic sediments along with the internal geometries of these sediments have been extensively determined to constrain the timing of thrusting.

The final versions of these 15 cross-sections are the result of a double loop of testing based on: a) comparison of thrust geometries, rotation, amount of shortening and ages of thrusting between different cross-sections, and b) correspondence between restored cross-sections and maps (palinspastic maps), simultaneously completed. The comparison between transects results in a network of cross-sections that forms an interpretation that is geometrically homogeneous and geologically consistent. The correspondence between restored cross-sections and maps results in a 3D restoration.

The network of cross-sections shows the along-strike varying structure of the southern Pyrenean cover thrust sheets. The study covers more than 150 km, from the easternmost cross-section J-1 to the westernmost cross-section J-13. The evolution, shortening and rates of shortening for the southern Pyrenean structural units can be briefly summarized as follows:

The positive inversion of the Mesozoic extensional basins and further southward motion restrained the irregular geometry of upper and older Pyrenean thrust sheets (Pedraforca and South Pyrenean Unit) and their limits (Segre thrust). The Vallfogona thrust branched eastwards with the Segre thrust (South Central unit) carrying the previously emplaced and blocked Pedraforca thrust sheets on its hanging wall, after 47 Ma. The eastern margin of the South Central Unit (Segre thrust zone) was emergent to the synorogenic surface and exposed to erosion throughout its evolution. The western margin was blind and accretionary during Middle-Upper Eocene. These two contrasting geometries were controlled by the original disposition of the Keuper décollement level.

Cross-section J-3 documents the most complete geological record to calculate shortening and time control. According to its restoration, the total amount of shortening is ~70 km for the cover thrust sheets. Shortening including all south-directed structures south of the North Pyrenean Fault is 88.5 km.

During the uppermost Cretaceous-Paleocene (83-55 Ma), rates of shortening were extremely low (<0.5 mm/yr.). From Early Ilerdian (55 Ma) to Middle Lutetian (47 Ma) rates of shortening increased to 4.4 mm/yr., mainly during the second half of this period (Fig. 2). Slowest rates of shortening (1.3-2.6 mm/yr.) characterized the period ranging from Middle Lutetian (47 Ma) to Early Miocene. The end of thrusting migrated from 34.4 Ma (J-1 section) in the East to 23 Ma (Riglos section) and younger to the West with rates of 11 mm/yr. in the eastern Pyrenees (34.4-29 Ma) and 21 mm/yr. in the central Pyrenees (29-23 Ma and younger).

### RESUMEN

La cadena del Pirineo tal como se observa actualmente, es el producto de una evolución compleja que engloba etapas previas a la colisión (tar-

dihercínicas y mesozoicas), la estructuración durante la colisión continental desde el Cretácico superior (aprox. 84 Ma) hasta el Oligoceno o Mioceno (aprox. 30 y 24 Ma) en las transversales estudiadas, y finalmente los procesos extensionales neógenos superpuestos a todos los anteriores.

Uno de los problemas no resueltos de la vertiente sur del Pirineo es el de las relaciones geométricas y temporales entre el Pirineo oriental y el central, a lo largo del cabalgamiento oblicuo del Segre (S, Fig. 1). Este estudio geológico propone una restitución en 3 dimensiones que proporciona un nuevo modelo cinemático para la zona estudiada. La restitución en 3D está basada en la integración de los datos geológicos de campo, de los sondeos y de las líneas sísmicas en una red de 15 cortes geológicos paralelos y perpendiculares a la dirección N-S del transporte tectónico. El resultado principal es el de obtener una base de datos estructural consistente del sector oriental y central del sur del Pirineo que permite presentar un modelo cinemático geoméricamente coherente y geológicamente posible. Además se ha realizado un esfuerzo importante en la cuantificación de los procesos geológicos en el marco del análisis estructural realizado.

Los cortes geológicos descritos en la memoria representan el producto final de una primera fase realizada a la escala de la transversal, con introducción de la información en 2 dimensiones (2D). Una segunda fase consiste en la comparación de la geometría de diferentes cortes, que junto con los cortes y mapas restituidos permite obtener un modelo en 3D formado por una red de cortes geológicos y de mapas palinspásticos. El control del factor tiempo introduce la cuarta dimensión en el modelo.

La discusión y las conclusiones obtenidas del estudio tectónico de la vertiente sur del Pirineo oriental y central se han separado en tres apartados: 1) los mapas palinspásticos que presentan una evolución regional de conjunto; 2) el margen oriental de los mantos de corrimiento del Pedraforca y de la Unidad Surpirenaica Central (P y USC, Fig. 1), que presenta una interpretación geométrica y temporal de acuerdo con los datos presentados y que permite ligar el Pirineo oriental y central; 3) la comparación de los resultados obtenidos a la escala de la cadena con los resultados a la escala de la tectónica de placas.

## EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE CABALGAMIENTOS Y CUENCAS DE ANTEPAÍS DEL PIRINEO ORIENTAL Y CENTRAL

La inversión tectónica positiva de las cuencas extensionales mesozoicas y su transporte tectónico posterior hacia el sur condicionó la geometría irregular de los mantos de corrimiento superiores (Pedraforca y Unidad Surpirenaica Central) y también la de sus límites (cabalgamiento del Segre). Esta forma irregular fue condicionada por la extensión de las cuencas del Triásico y del Jurásico(?) más que por la del Cretácico superior (de carácter expansivo). La restitución de la cuenca mesozoica al norte (pirenaica) y al sur (catalánide), al final del Paleoceno (~55 Ma), indica una zona intermedia en la que afloran rocas del basamento paleozoico que fueron el área fuente de las cuencas paleocenas situadas en las

zonas más externas del Pirineo como la cuenca de Àger. El acortamiento durante este periodo se realizó por la inversión tectónica de las cuencas extensionales del Cretácico inferior, desarrollando los mantos de Bóixols y superior del Pedraforca (B y P, Fig. 1).

Durante el periodo correspondiente al Eoceno inferior (55-51 Ma), los límites de los diferentes elementos geológicos descritos anteriormente muestran pocas variaciones. La actividad tectónica más importante fue el desplazamiento del manto del Montsec y la formación de un sistema extenso y poco importante de pliegues y cabalgamientos despegado a nivel del Keuper que deformaron a los futuros mantos inferior del Pedraforca, en el Pirineo oriental, y Sierras Marginales, en el Pirineo central (SM, Fig. 1). La cuenca de antepaís de Ripoll, actualmente manto del Cadí (C, Fig. 1), se situó al sur del manto inferior del Pedraforca y al este de la Unidad Surpirenaica Central, con una dirección general ENE-WSW. La cuenca de Ripoll fue paralela a la cuenca de Tremp, situada encima de la Unidad Surpirenaica Central. La continuación occidental de la cuenca de Ripoll se situó en las actuales Sierras Marginales.

Con posterioridad a los 51 Ma se produjo un cambio del estilo tectónico de los pliegues despegados, descritos en la etapa anterior, al transporte tectónico hacia el sur de todas las estructuras previas por encima de un cabalgamiento basal que cortó mediante una rampa de poco ángulo a la serie eocena del bloque inferior. El avance hacia el sur de los mantos del Pedraforca y de la Unidad Surpirenaica Central cerró parcialmente la cuenca de Ripoll en la que se depositaron espesores considerables de evaporitas (>1000 m). El cabalgamiento basal del Pedraforca (en el Pirineo oriental) quedó bloqueado y fue fosilizado por los depósitos de la Fm. de Coubet (~47 Ma). El acortamiento se transfirió al cabalgamiento de Vallfogona (V, Fig. 1), que transportó a los mantos del Pedraforca en su bloque superior. La transferencia del acortamiento hacia el cabalgamiento de Vallfogona se realizó mediante una secuencia de bloque inferior.

El cabalgamiento de Vallfogona se entroncó con el cabalgamiento Surpirenaico (el cabalgamiento frontal de la Unidad Surpirenaica Central, ESP, Fig. 1) al oeste del manto del Port del Comte (PC, Fig. 1). La reconstrucción efectuada a los 37.2 Ma indica que el frente de la Unidad Surpirenaica Central se situaba en contacto con la cuenca salina y marina de Cardona. Actualmente, la cuenca salina de Cardona continua por debajo de la Unidad Surpirenaica Central hasta que queda cortada por el cabalgamiento Surpirenaico y pasa a formar par-

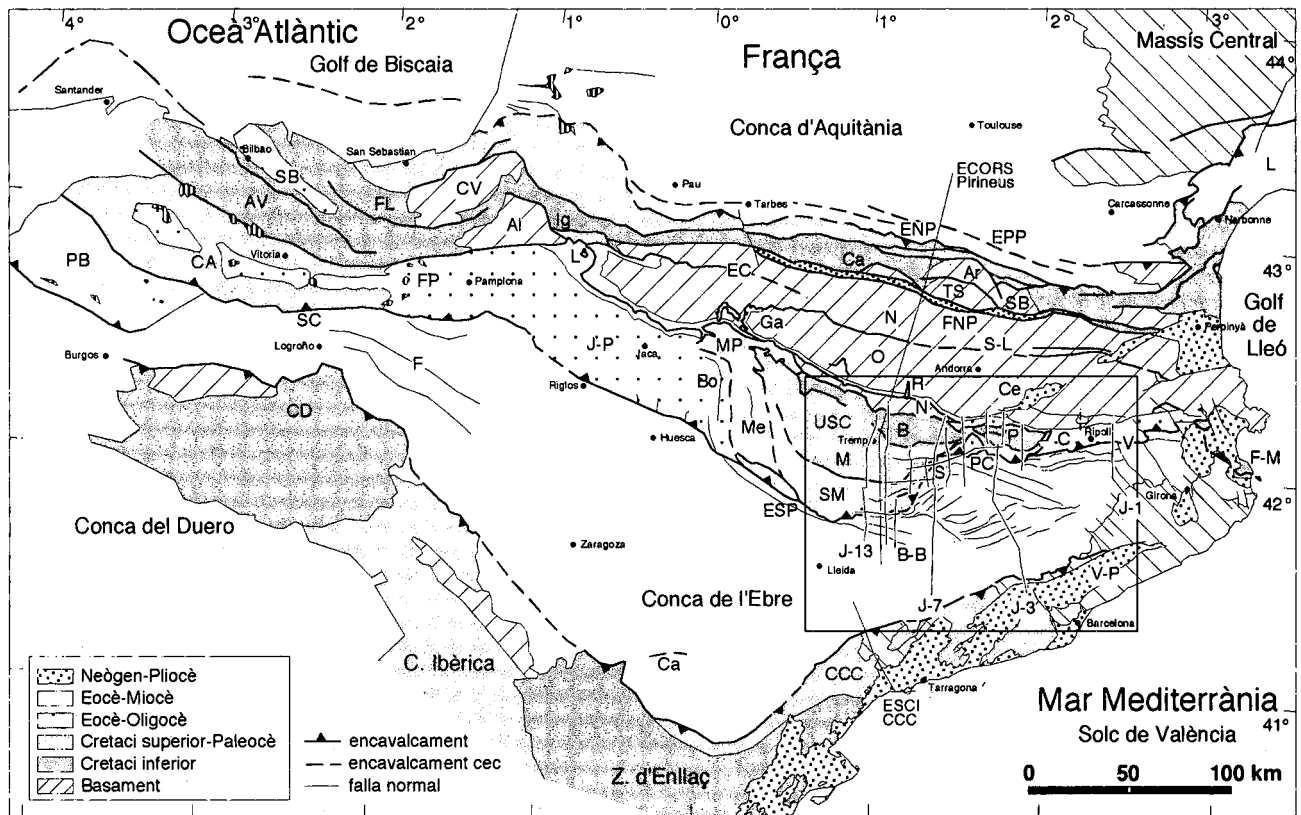


Figura 1. Esquema estructural de la part NE de la península Ibèrica amb el Pirineu, la Cadena Costera Catalana (CCC en la figura) i la Cadena Ibèrica, que formen els marges de la cuenca d'antepaís del Ebro. La zona de estudi es marca en el Pirineu i cuenca d'antepaís oriental i central. Els cortes geològics s'han representat en traça gruixa.

Figure 1. Structural map of the NE part of the Iberian peninsula with location of the study area and cross-sections. Basement rocks are depicted with oblique pattern both allochthonous and autochthonous as the Guilleries (G). Different Pyrenean thrust sheets are depicted with different grades of shadow. Upper and older thrust sheets are depicted with dark patterns and lower and younger thrust sheets are depicted with light patterns.

te del manto de Jaca-Pamplona en la zona de Navarra (J-P, Fig. 1).

Durante la etapa final de la compressió, corresponent al Eoceno superior-Oligoceno inferior (34.4-28.7 Ma), els anticlinals de Puig-reig i de Oliana se formaren paral·lels i relacionats amb el marge nord de les sales de la Fm. de Cardona, amb una direcció ESE-WNW. El extrem occidental del anticlinal de Oliana se formó en el bloque inferior del cabalgament Surpirenaic. El desplaçament de la Unitat Surpirenaica Central cap al sud giró l'anticlinal en el sentit antihorari ~35°. La deformació de la cuenca d'antepaís del Ebro mitjançant un sistema de pliegues i cabalgaments poc importants i despegat per encima de les sales de la Fm. de Cardona elevà la topografia del sector produint una migració del centre de cuenca lacustre al SW del sistema de retro-cabalgaments de Sanauja i Barbastro-Balaguer (B-B, Fig. 1).

La relació entre els mantos de cobertura i les unitats de basament, els mantos del Pedraforca se emplaçaren conjuntament amb la gran unitat de basament de les Nogueras (N, Fig. 1) fins als 47 Ma. Aquesta gran unitat tectònica formada pels mantos del Pedraforca, de la Unitat Surpirenaica Central i de les Nogueras se enraïzà en el cabalgament de Soldeu-Lanou (S-L, Fig. 1).

#### GEOMETRIA I EVOLUCIÓ DEL MARGEN ORIENTAL DE LA UNITAT SURPIRENAICA CENTRAL (CABALGAMENT DEL SEGRE). COMPARACIÓ AMB EL MARGEN OCCIDENTAL DE LA UNITAT

El marge oriental dels mantos del Pedraforca i de la Unitat Surpirenaica Central mostra una evolució contínua en el temps. Durant aquesta evolució contínua,

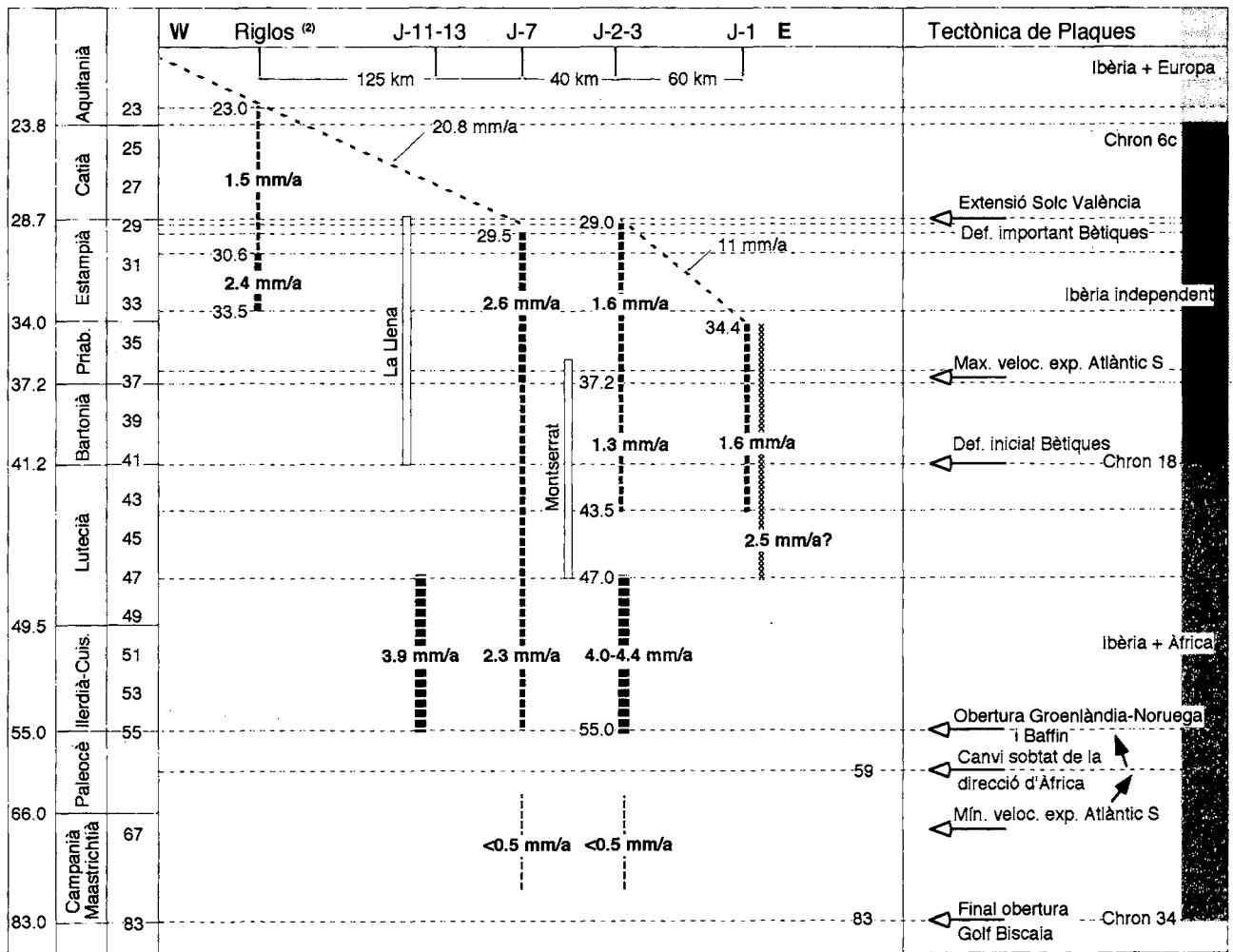


Figura 2. Diagrama de la velocitat de acortament tectònic en la vertiente sur del Pirineo, especialment de la regió estudiada. Les velocitats més altes de acortament (~4 mm/a), durant el Eoceno inferior i mitjà, corresponen a un període de temps en el que la placa ibèrica té el seu únic límit lliure en el Pirineo (basat en altres conjunts de dades geològiques i geofísiques). La migració del final de la deformació important occidental migra cap a l'oest a una velocitat de 1-2 cm/a i coincideix amb el començament de la deformació en les Bètiques i amb l'extensió del Mediterrani occidental (formació del Golf de Leó i del Surco de València).

Figure 2. Rates of shortening based on balanced and restored cross-sections covering 225 km along the strike of the chain. The right side of the panel indicates plate tectonic events occurring during thrusting in the Pyrenees. High rates of thrusting in the Pyrenees coincide with the period of time in which Iberia was joined to Africa. The end of Pyrenean thrusting is diachronous along the strike of the chain, occurs at a migration rate of 1-2 cm/yr, and roughly corresponds with important deformation in the Betics and with extension of the westernmost Mediterranean Sea related with the formation of the Gulf of Lions and València Trough.

el marge sempre emergent i sotmès a erosió. Diferents segments del marge van ser bloquejats iniciant-se el procés al nord i finalitzant al sud, en la part més externa, tot i amb variacions locals. El marge oriental del mantó del Pedraforca va ser actiu fins als 47 Ma, el cabalgament del Segre (marge nord de la Unitat Surpirenaica Central), situat en el bloque superior del anticlinal de Oliana va ser actiu fins als 34 Ma i el segment sud del cabalgament Surpirenaic ho va ser fins als ~32 Ma. Aquesta evolució del marge oriental de

la Unitat Surpirenaica Central, emergent i erosiva, contrasta amb la del marge occidental corresponent al conjunt de pliegues de direcció ~N-S, de Mediano, Boltaña i altres (Me i Bo, Fig. 1). El desenvolupament d'aquests pliegues va ser degut a la propagació cega del cabalgament oblic del marge occidental de la Unitat Surpirenaica Central. La distribució irregular i obliqua de les roques mesozoiques respecte de la Unitat Surpirenaica Central va controlar el que el seu marge oriental fos emergent i erosiu mentre que el seu marge occi-

dental fue ciego y acrecional, por lo menos hasta el Eoceno más superior.

## ACORTAMIENTO Y VELOCIDAD DE ACORTAMIENTO: RELACIÓN CON LA TECTÓNICA DE PLACAS (FIG. 2)

El cálculo del valor del acortamiento total y parcial, calculado a partir de los cortes compensados y restituidos, junto con la edad de los sedimentos sin- y post-tectónicos relacionados con cada una de las estructuras tectónicas ha permitido calcular las velocidades del acortamiento tectónico en distintas transversales. Estas velocidades indican 3 periodos bien diferenciados, que se pueden asociar al emplazamiento de los distintos mantos de corrimiento pirenaicos. Así, la inversión tectónica de los mantos de Bóixols y superior del Pedraforca se realizó a una velocidad muy lenta ( $<0.5$  mm/a) desde el final del Cretácico superior hasta el Paleoceno. El plegamiento y emplazamiento del manto inferior del Pedraforca y de la Unidad Surpirenaica Central junto con la unidad de las Nogueres, se realizó a una velocidad alta (3.9-4.4 mm/a) desde el Ilerdense (55 Ma) hasta el Luteciense medio (47 Ma). A partir del Luteciense medio, las velocidades de acortamiento fueron de 1.3 a 2.6 mm/a.

Así como el inicio de la deformación durante el Cretácico superior parece estar presente en toda la cadena pirenaica, el análisis del acortamiento durante el Eoceno-Oligoceno permite indicar que el final de la deformación fue heterocrono, siendo más moderno hacia el oeste de la cadena. La migración del final de la deformación realizó a una velocidad de 11 mm/a entre el Pirineo oriental (corte J-1, en el río Freser) y el central (corte J-3, en el río Cardener), pasando a 21 mm/a entre los cortes J-7 (en el río Segre) y la zona de Riglos (en el río Gállego). Entre la transversal de Riglos, donde el final de la deformación se situó en el Aquitaniense inferior ( $\sim 23$  Ma) y la transversal de la Sierra de Cantabria (SC, Fig. 1) donde se situó en el Mioceno medio ( $\sim 16$  Ma), la migración del final de la deformación se transmitió a  $\sim 20$  mm/a.

La velocidad del acortamiento permite conocer la cinemática del límite norte de la placa ibérica desde el Cretácico superior hasta el Mioceno. Los 3 periodos de deformación caracterizados por las diferentes velocidades de acortamiento pueden interpretarse dentro del marco de la tectónica de placas y ligadas a cambios de la cinemática de estas (reorganización de placas). La deformación fue continua, indicada por un desplazamiento

tectónico de las unidades hacia el sur, con variaciones de la velocidad de transporte desde el Eoceno inferior hasta el Oligoceno inferior en el este, hasta el Oligoceno superior en el centro y hasta el Mioceno en el oeste de la cadena. El valor del acortamiento aumenta hacia el centro de la cadena (entre los cortes J-3 y J-13), con valores de  $\sim 70$  Km para los mantos de la cobertera y un total de 90 Km para el sistema de cabalgamientos surpirenaico.

Fecha de lectura: 2 de Noviembre de 1993

Tesis Doctoral original:

Vergés, J. (1993). Estudi geològic del vessant sud del Pirineu oriental i central. Evolució cinemàtica en 3D. Tesi doctoral Universitat de Barcelona, 203 pp.

Publicación completa con extensos resúmenes en Inglés:

Vergés, J. (en prensa). Estudi geològic del vessant sud del Pirineu oriental i central. Evolució cinemàtica en 3D. Institut Cartogràfic de Catalunya, Servei Geològic, Monografia Tècnica.

Directores de Tesis:

Dr. Pere Santanach i Prat

Dr. Josep Anton Muñoz de la Fuente  
Universitat de Barcelona