

UNIVERSIDAD DE BURGOS

ESCUELA DE DOCTORADO

TESIS DOCTORALES

- TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN PALEOMAGNÉTICA DE PROCESOS DEFORMACIONALES EN CUENCAS INTRAPLACA (ALTO ATLAS CENTRAL): DIAPIRISMO, COMPRESIÓN E INTRUSIONES ÍGNEAS.
- AUTOR:** CALVÍN BALLESTER, PABLO
- PROGRAMA DE DOCTORADO:** EVOLUCIÓN HUMANA, PALEOECOLOGÍA DEL CUATERNARIO Y TÉCNICAS GEOFÍSICAS APLICADAS A LA INVESTIGACIÓN
- FECHA LECTURA:** 30/11/2018
- HORA:** 11:00
- CENTRO LECTURA:** ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR (CAMPUS RÍO VENA). SALA DE JUNTAS 2
- DIRECTORES:** JUAN JOSÉ VILLALALÁIN SANTAMARÍA y ANTONIO MARÍA CASAS SAINZ.
- TRIBUNAL:** MARÍA LUISA ARBOLEYA CIMADEVILLA
EMILIO LUIS PUEYO MORER
MARÍA LUISA OSETE LÓPEZ
JOSEP MARÍA PARÉS CASANOVA
CHARLES AUBOURG
- RESUMEN:** El sistema del Atlas está formado por un conjunto de cuencas mesozoicas intraplaca que fueron invertidas durante el Cenozoico, consecuencia de la convergencia entre la placa Africana con las placas Ibérica y Euroasiática. Dichas cuencas se generaron durante el Mesozoico ligadas a la apertura del Atlántico y a la evolución del Tethys, siendo afectadas por dos episodios de rift (Triásico y Jurásico Inferior) y los consiguientes periodos de post-rift. El área de estudio se encuentra en la zona central del Alto Atlas Central (Marruecos), caracterizado estructuralmente por la presencia de anticlinales apretados de dirección NE-SO a ENE-OSO que limitan sinclinales amplios y laxos. La serie mesozoica está caracterizada por la presencia de potentes series jurásicas con más de 6-7 km de espesor en los depocentros y formadas esencialmente por carbonatos marinos, si bien los materiales del Jurásico Medio registran una continentalización de los depósitos. En el área de estudio no se observan materiales más modernos al Jurásico Medio, aunque en varias cuencas situadas al norte afloran materiales continentales del Jurásico Superior y el Cretácico.
- En el núcleo de los anticlinales afloran importantes series basálticas asociadas al

CAMP emplazadas en condiciones subaéreas durante el Triásico Superior. Además, afloran materiales plutónicos de edad Jurásico Medio-Superior compuestos principalmente por troctolitas, gabros y sienitas. Asociado a la etapa de vulcanismo jurásico se observan numerosos diques y, en las cuencas situadas al norte dan lugar a dos conjuntos de coladas basálticas de edad Jurásico Superior y el Cretácico Inferior.

Existen evidencias (variaciones de espesor, discordancias en los flancos de los anticlinales, etc.) de una importante actividad halocinética durante el Jurásico Inferior-Medio, que condicionó la subsidencia en la cuenca del Atlas definiendo áreas con subsidencia diferencial. Esta actividad halocinética generó importantes estructuras diapíricas que deformaron los materiales jurásicos.

Los carbonatos jurásicos que afloran en el área de estudio están afectados por una remagnetización química regional portada por cristales monodominio estable (SSD) de magnetita, que ha sido previamente datada como Albiense-Cenomaniense (ca. 100 Ma). Esta remagnetización tiene un carácter interplegamiento, dado que se adquirió en un momento de no deformación que separa dos eventos de plegamiento diferentes (asociados a la extensión jurásica y la compresión cenozoica). Trabajando con este tipo de remagnetizaciones, el uso de las técnicas de círculos menores (SC) permite (i) calcular la dirección de la remagnetización para el área de estudio y (ii) restituir el paleobuzamiento de las capas, i.e., calcular el buzamiento que presentaban las capas en el momento de adquisición de la remagnetización. Una vez conocidos los paleobuzamientos, estos pueden ser usados para realizar restituciones parciales que permiten reconstruir cómo era la estructura en el momento de la adquisición de la remagnetización.

Respecto al desarrollo metodológico centrado en los métodos SC, en esta tesis doctoral se presenta un nuevo programa informático (PySCu) que permite realizar todos los cálculos asociados al método de manera rápida y sencilla. PySCu ha sido escrito en lenguaje Python, siendo una aplicación sencilla, de código libre y multiplataforma. Esta nueva aplicación incorpora una mejora sustancial en el cálculo de la incertidumbre de la dirección de la remagnetización: mediante el uso de la técnica de *bootstrap* se determina la propagación del error en la dirección calculada de la incertidumbres provenientes de las direcciones paleomagnéticas medias y de los datos de estratificación.

Cuando se usan las técnicas SC se asumen una serie de hipótesis de partida: (i) la remagnetización es sincrónica a escala geológica, (ii) las direcciones paleomagnéticas no registran rotaciones de eje vertical (VAR) y (iii) las etapas de deformación pre- y post-remagnetización son coaxiales. Utilizando simulaciones con datos artificiales y considerando tanto la presencia de VAR como la no coaxialidad entre las dos etapas de deformación, hemos podido observar y

cuantificar la influencia del no cumplimiento de ambas hipótesis de partida en el cálculo tanto de la dirección de remagnetización como de los paleo-buzamientos.

La presencia de VAR afecta de manera importante al cálculo de la dirección de remagnetización, obteniéndose de manera sistemática inclinaciones más altas a las esperadas. Por otro lado, las VAR generan patrones característicos en el cálculo de paleobuzamientos, infra- y sobre-estimando los mismos de manera simétrica en flancos opuestos. Estas dos afecciones de la presencia de VAR en los resultados pueden ayudar a detectar la presencia de VAR cuando se trabaja con datos reales. La no coaxialidad afecta en menor grado a los resultados que se obtienen al aplicar los métodos SC, y ni la dirección de remagnetización calculada ni los paleo-buzamientos presentan grandes dispersiones respecto a los valores esperados en la mayoría de los modelos.

La comparación entre las simulaciones y los datos reales muestran que el área de estudio cumple las hipótesis de partida necesarias para la aplicación de las técnicas SC. Por otro lado, la comparación de la estratificación entre las estaciones en las que domina la deformación pre- y post-remagnetización muestra un ajuste cilíndrico similar, indicando que ambas etapas de deformación son coaxiales.

A partir de los datos de paleo-buzamientos calculados con las técnicas SC se han elaborado cortes geológicos que representan la geometría del área en el momento de la adquisición de la remagnetización (ca. 100 Ma). La comparación de estos cortes geológicos con los que ilustran la estructura actual ha resultado ser una herramienta útil para resolver varios problemas geológicos presentes en el área de estudio. (i) El área está afectada por una foliación regional, cuya formación ha sido atribuida tanto al Jurásico como al Cenozoico por diferentes autores. La restitución de pliegues con foliación de plano axial asociada ha mostrado que estos post-datan la remagnetización, y por tanto, tanto los pliegues como la foliación asociada se generaron durante la compresión cenozoica. (ii) Por otro lado, la restitución de diferentes anticlinales muestra diferentes grados de estructuración durante el Jurásico. Algunas de las estructuras se encontraban ya prácticamente estructuradas antes de ca. 100 Ma, con flancos que presentaban buzamientos moderados a altos, disminuyendo progresivamente hacia los sinclinales. Por el contrario, en otras estructuras la deformación pre-100 Ma se limita a las áreas en contacto con el núcleo (a menos de 500 m de distancia). Esta deformación pre-remagnetización es consecuencia de procesos halocinéticos que generaron una serie de *salt-walls*, con distinto grado de desarrollo, que limitaban pequeños depocentros sedimentarios. Estas estructuras parecen estar relacionadas en profundidad con fallas normales de basamento que controlaban la subsidencia tectónica del área. Es importante destacar que el estilo de deformación durante la compresión cenozoica fue condicionada por la herencia de la etapa extensional

mesozoica.

Del mismo modo que se pueden restituir las capas estratigráficas mediante el paleo-buzamiento, también pueden ser restituidos otros elementos presentes en las rocas, como por ejemplo su petrofábrica o las fábricas magnéticas. Cuando se trabaja con fábricas magnéticas, es usual comparar las mismas en su disposición *in situ* y tras realizar la restitución total de las mismas (restituyendo la estratificación a la horizontal). Dado que es posible conocer el paleobuzamiento de las capas, es posible realizar la restitución parcial de la fábrica magnética y compararla con las anteriores.

La restitución de la anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (AARM) ha permitido obtener significativos avances en el conocimiento del crecimiento de los granos SSD de magnetita que portan la remagnetización. Se ha comparado la AARM de diferentes estaciones paleomagnéticas con diferente buzamiento y paleobuzamiento, antes de realizar la corrección de capa, tras abatir las capas a la horizontal, y abatiendo las mismas a su posición en el momento de la remagnetización. Tras realizar la restitución parcial se observa el mejor agrupamiento de los ejes magnéticos principales, definiéndose una foliación horizontal y una lineación horizontal NNO-SSE, paralela a la dirección de extensión regional. Esto ha sido interpretado como (i) un crecimiento de los cristales SSD que no sigue estructuras previas, (ii) sino que crecen orientados según el campo de esfuerzos presentes en el momento de la remagnetización. Así mismo, la ausencia de fábricas compresivas en la AARM indica que estos granos de magnetita no han sido afectados por la foliación cenozoica presente en el área de estudio. Este hecho lo interpretamos (iii) como un indicador de que los granos de magnetita crecen reemplazando cristales de pirita, que por una parte les proporcionan un medio isótropo en el que crecer siguiendo el campo de esfuerzos, y por otro dificultan una reorientación de los granos durante la compresión posterior.

El análisis de la anisotropía de la susceptibilidad magnética a temperatura ambiente (RT-ASM) y su comparación con diferentes subfábricas (LT-ASM y AARM) permite distinguir diferentes comportamientos de RT-ASM. El tipo 1 presenta el mismo comportamiento que el definido para la AARM, y presenta diferencias direccionales con la LT-ASM. Por el contrario, en los tipos de RT-ASM 3 y 4 ésta es coincidente con la LT-ASM pero no con la AARM, y la lineación magnética es paralela a la lineación de intersección entre estratificación y foliación, indicando que se trata de una fábrica tectónica compresiva. La diferencia entre los tipos 3 y 4 radica en que en el primero la foliación magnética es paralela a la estratificación y en el segundo es paralela a la foliación tectónica. Finalmente, el tipo 2 muestra características intermedias entre los anteriores. La comparación entre las diferentes subfábricas, así como el análisis de las

propiedades magnéticas de muestras pertenecientes a los diferentes grupos, ha permitido conocer que los portadores de la RT-ASM del grupo 1 es magnetita superparamagnética generada durante el proceso de remagnetización y con la misma orientación que los granos SSD que portan la AARM. Por el contrario, la RT-ASM de los tipos 3 y 4 es portada por filosilicatos, que ha diferencia de los granos ferromagnéticos, registran la compresión cenozoica.

Los gabros jurásicos presentes en el núcleo de los anticlinales también han sido estudiados paleomagnéticamente. En ellos se ha observado una componente paleomagnética con temperaturas máximas de desbloqueo de 580°C portada por magnetita. Cuando las direcciones paleomagnéticas medias de las diferentes estructuras son analizadas de manera conjunta, se observa una gran dispersión de los datos atribuible a causas tectónicas. Al analizar las direcciones separadas por estructuras, se observa que las mismas se disponen sobre círculos menores cuyo eje es horizontal y paralelo a cada estructura; esto es claramente observable en las estructuras más orientales, donde la dispersión de las direcciones es menor y la disponibilidad de datos es mayor. Este agrupamiento de las direcciones sobre círculos menores es interpretada como que la dispersión de las direcciones es consecuencia de un plegamiento de eje horizontal consistente con el desarrollo cenozoico de los anticlinales. Además, la mayoría de las estaciones han registrado rotaciones antihorarias de eje horizontal (mirando hacia el NE / ENE), indicando una vergencia predominante de las estructuras hacia el NNO / NO.

Las fábricas magnéticas de los gabros son coincidentes con la petrofábrica definida por los cristales de plagioclasa. Antes de realizar ninguna corrección, la orientación de los ejes principales muestra gran dispersión entre las diferentes estaciones. Sin embargo, y usando la información proveniente del análisis paleomagnético, cuando las fábricas magnéticas son restituidas a su posición de emplazamiento, los ejes principales de las diferentes estaciones paleomagnéticas de cada estructura anticlinal son coherentes entre sí.

Se han podido diferenciar dos tipos de estructuras en base a la información proveniente del estudio paleomagnético y de fábricas magnéticas. (i) En las estructuras más occidentales, donde el ratio entre rocas dúctiles y rígidas en el núcleo de las mismas es mayor, las rotaciones registradas son mayores, y la fábrica magnética muestra una foliación horizontal y una lineación horizontal NO-SE, que ha sido interpretada como reflejo de la tectónica extensional presente durante la intrusión de las rocas ígneas. (ii) Por el contrario, en las estructuras orientales, cuyo núcleo está compuesto esencialmente por rocas ígneas, las rotaciones registradas son menores; las fábricas magnéticas presentan pautas más complejas, dominando lineaciones N-S a NE-SO y foliaciones con diferente inclinación, y que pueden ser interpretadas como consecuencia del emplazamiento del magma en áreas con poco espacio, y por tanto el flujo del mismo estaría

condicionado por las estructuras NE-SO.

Palabras clave: remagnetización, paleomagnetismo, fábricas magnéticas, magnetita, círculos menores, Alto Atlas Central.

Abstract

The Atlas System comprises a set of intraplate basins inverted during the Cenozoic as a consequence of the Africa-Iberia-Eurasia convergence. These basins were developed during the Mesozoic in two rifting stages (Triassic and Early Jurassic), influenced both by the opening of the Atlantic and the evolution of the Tethys. The study area is located in the middle of the Central High Atlas (Morocco) and is characterized by NE-SW to ENE-WSW tight anticlines separating open, gentle synclines. The Mesozoic sequence reaches big thickness (more than 6-7 km) in the depocenters. This sequence is mainly composed by Lower-Middle Jurassic marine carbonates that pass upwards into continental red beds (Middle Jurassic sediments). No younger sediments crop out in the study area but in the northern basins Upper Jurassic to Lower Cretaceous continental sediments can be observed.

Basalts linked with the CAMP event and emplaced in sub-aerean conditions at the end of the Triassic crop out in the core of the anticlines, together with Upper Jurassic plutonic rocks (mainly troctolites, gabbros and sienites) and Triassic shales and salts. Associated with the Jurassic volcanic event several dykes and, in the northern basins, two sets of basaltic lava flows that were emplaced during the Late Jurassic and the Early Cretaceous can be observed.

Several aspects (growth strata, angular unconformities in the limbs of the anticlines, etc.) evidence a major halokinetic activity during the Early-Middle Jurassic, which conditioned the sedimentation in the region defining areas with differential subsidence. Besides, this halokinetic activity deformed the Jurassic carbonates during the development of diapirs and salt-walls.

The Jurassic carbonates of the Central High Atlas record a widespread chemical remagnetization, carried by stable single domain (SSD) magnetite, which has been previously dated as Albian-Cenomanian (ca. 100 Ma). This is an interfolding remagnetization since it is temporally bracketed between two folding stages (Jurassic extension and Cenozoic compression). Working with this kind of remagnetizations, the small circle (SC) tools allow (i) to calculate the remagnetization direction and (ii) to restore the beds at the remagnetization time i.e., to calculate the paleodip of the beds. Once that the paleodips are know, they can be used to restore partially the structure and to show how was the structure during the remagnetization acquisition.

In regard with the methodological development of the SC tools, in this doctoral thesis is presented a new software (PySCu) allowing to perform the necessary SC calculations in a simple way. As PySCu is written in language Python, the application is open and cross-platform. Moreover, this incorporates an improvement in the calculation of the

uncertainty associated to the calculated remagnetization direction: using bootstrap the program estimates the error propagation in the calculated direction resulting from the uncertainty of the mean paleomagnetic direction and the bedding.

Using the SC tools, three main starting hypotheses must be considered: (i) the remagnetization must be geologically synchronous, (ii) there is an absence of vertical axis rotation (VAR) and (iii) the pre- and post-remagnetization folding are coaxial. Through simulations of artificial data that consider both presence of VAR and non-coaxiality the effect in the results of the non fulfillment of the starting hypotheses was evaluated.

The presence of VAR affects strongly the calculation of the remagnetization direction and systematically higher inclinations than expected are obtained. On the other hand, VARs generate characteristic patterns in the calculation of the paleodip, over- and under-estimating symmetrically the paleodip in opposite limbs. These features can help to detect the presence of VARs. On the other hand, the non-coaxiality affects in lesser degree both to the remagnetization direction and the paleodip calculations.

The comparison between simulations and real data shows that the study area fulfills the starting hypotheses necessary for the application of the SC tools. Moreover, the comparison of the bedding between sites affected mainly by the pre-remagnetization deformation with sites in which the post-remagnetization deformation dominates, indicates that both folding states are nearly coaxial.

Present-day and restored (at the remagnetization time, ca. 100 Ma) geologic cross-section have been compared and this practice has shown to be a useful tool to unravel and clarify some geological aspects present in the study area: (i) the region is affected by a regional cleavage considered alternatively as Jurassic and Cenozoic by different authors. The folds with axial-plane cleavage clearly post-date the remagnetization because they completely unfold after the partial restoration. This means that cleavage developed during the Cenozoic compression. (ii) On the other hand, the restoration of several anticlines shows a different degree of development of the structures at the remagnetization time. Some of them were already structured at ca. 100 Ma, with steep limbs that become progressively horizontal towards the synclines, whereas in other structures the pre-100 Ma structure is gentler and limited to the proximity of their cores (affecting only to the nearest 500 m). This pre-remagnetization deformation is mainly the consequence of the halokinetic process that generated diapirs and salt-walls with different degrees of development. These structures seem to be related to basement normal faults that controlled the tectonic subsidence. Besides, the structure inherited from the extensional stage had a main role controlling the subsequent deformation during compression.

As well as the beds can be restored, other structural elements that can be related to bedding can also be restored using the paleodip, as for example the petrofabric or the magnetic fabrics. It is a common procedure to compare the *in situ* magnetic fabrics with the totally restored (rotating the bedding to the horizontal) ones; knowing the paleodip, they also can be compared with the partially restored (rotating the bedding to the paleobedding) magnetic fabrics.

The restoration of the anisotropy of the anhysteretic remanent magnetization (AARM) has allowed to put forward significant advances in the understanding of how the SSD magnetite grains that carry the remagnetization grow. The AARM has been measured in sites with different dips and paleodips, and the orientation of the principal axes of all sites has been compared before apply any bedding correction, after apply the total bedding correction (i.e., restoring the bedding to the horizontal) and after apply the partial bedding correction (i.e., restoring the bedding to their attitude at the remagnetization time). Comparing these three stages, the best clustering of the principal axes is reached after the partial bedding correction, when a prolate ellipsoid with horizontal magnetic foliation and horizontal NNW-SSE magnetic lineation, parallel to the general tectonic extension is defined. This has been interpreted because either: (i) the neoformed magnetite grains grew without following any preexisting structure or, conversely, (ii) the magnetite grains grew following the extensional tectonic constraints present in the Atlas at the remagnetization time, producing a weak but well-defined magnetic fabric. Furthermore, the absence of compressive fabrics in the AARM shows that the magnetite grains were not affected by the Cenozoic cleavage present in the study area. (iii) We interpret these facts as an indicator that the magnetite grains grew replacing pyrite crystals that, on one hand, offers an isotropic frame within which the grains can grow following the tectonic constraints and, on the other hand, the pyrite grains deflect the deformation directions associated with cleavage development.

The analysis of the anisotropy of the magnetic susceptibility measured at room temperature (RT-AMS) and its comparison with different subfabrics (LT-AMS and AARM) allow to unravel four different behaviors in RT-AMS. Type 1 RT-AMS shows the same behavior that the already described by AARM and RT-AMS is not coincident with LT-AMS. Conversely, type 3 and 4 RT-AMS are coincident with the LT-AMS but not with AARM; in these cases the magnetic lineation is parallel to the intersection lineation defined between cleavage and bedding (it is a tectonic compressive fabric); the difference between the two fabrics is that the magnetic foliation in type 3 is parallel to bedding and in type 4 is parallel to cleavage. Finally, type 2 shows intermediate behavior between the previous ones. The comparison between the different subfabrics, as well as the interpretation of rock magnetic measurements, allow to explain the type 1 RT-AMS as carried by superparamagnetic magnetite neoformed during the remagnetization process; these grains have the same distribution than the SSD magnetites that carry the remagnetization. On the other hand, type 3 and 4 RT-AMS are carried by phyllosilicates, which at difference with ferrimagnetic grains are affected by the Cenozoic compression.

The Jurassic gabbros that crop out at the core of the anticlines have also been analyzed paleomagnetically. A stable paleomagnetic component with maximum unblocking temperatures around 580°C that is carried by magnetite has been isolated. The mean paleomagnetic directions show a strong scatter when all structures are analyzed together. This scattering has been interpreted as a consequence of tectonic movements. However, when the mean paleomagnetic directions are plotted for each structure separately, the directions are located over same small circles, with horizontal axes parallel to the main trend of each respective structure; this is evident in the western structures, where the scatter is lower and there are available more site-mean paleomagnetic directions. The dispersion of the paleomagnetic directions over small circles parallel to each structure is interpreted as the result of the Cenozoic folding. Besides, most of the sites record counter-clockwise rotation (looking towards the NE / ENE) that means that the structures present a dominant vergence towards the NW / NNW.

The magnetic fabrics in the gabbros are coincident with the petrofabric defined by the plagioclase crystals. Before any correction, the orientation of the main axes show a strong scattering between sites. However, and using the information that come from the paleomagnetic analysis, when the magnetic fabrics are restored to the emplacement position, they show a better cluster and are coherent in each structure.

According to paleomagnetic results and magnetic fabrics two kind of structures have been differentiated: (i) in the western structures, where the ratio between ductile and igneous rocks is higher, the recorded rotations are bigger. The magnetic fabrics show mainly horizontal magnetic foliations and horizontal NW-SE magnetic lineations that we interpret as the reflect of the regional tectonic extension during the intrusion of the igneous rocks. (ii) On the other hand, in the eastern structures the ratio is lower and the cores of the anticlines are mainly composed by igneous rocks. In these cases the rotations are smaller and the magnetic fabrics show more complex patterns; the magnetic lineations are mainly horizontal and N-S to NE-SO, and the magnetic foliation presents different attitude. This is likewise consequence of the emplacement of the magma with limited space and the magnetic fabrics reflect the different flux controlled by the structural frame.

Key words: remagnetization, paleomagnetism, magnetic fabrics, magnetite, small circles, Central High Atlas.