

Extensional attenuation of the Malaguide and Alpujarride thrust sheets in a segment of the Alboran basin folded during the Tortonian (Lorca area, Eastern Betics)

Guillermo Booth-Rea*, Víctor García-Dueñas, José Miguel Azañón

Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, 18076 Granada, Spain

Received 26 February 2002; accepted 24 April 2002

Communicated by Michel-Durand Delga

Abstract – Two systems of low-angle normal faults (LANFs), formed by listric faults and detachments, superimposed on a previous thrust stack, attenuate the upper allochthonous units of the Alboran Crustal Domain, particularly the Malaguide and Alpujarride units, which presently constitute the basement of the Lorca basin (Eastern Betics). The structurally highest detachment separates the Upper Malaguide units from the Lower Malaguide units, and has a north-northwest transport sense. This detachment is tilted by listric normal faults, with west-southwest transport, which seat on a fault zone with ramp-flat geometry in the Alpujarride complex. The LANFs have thinned the Alpujarride and Malaguide complexes of the Alboran Crustal Domain, contributing during the Lower–Middle Miocene to the formation of the ‘Palaeo-Alboran’ basin, and have been later exhumed from below the sedimentary cover of the Lorca Basin, in the core of an Upper-Miocene anticline. **To cite this article:** G. Booth-Rea et al., *C. R. Geoscience 334 (2002) 557–563*. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Alboran Crustal Domain / Eastern Betics / Maláguide Complex / Alpujarride Complex / extensional tectonics

Résumé – Amincissement extensif des nappes Malaguides et Alpujarrides dans un segment du bassin d’Alboran au Tortonien (région de Lorca, Bétiques orientales). Deux systèmes de failles normales à faible angle (FNFA), formés d’éventails listriques et de détachements, surimposés à un empilement de nappes antérieur, amincissent les unités supérieures du domaine crustal d’Alboran, particulièrement les unités Malaguides et Alpujarrides, qui constituent le socle du bassin néogène de Lorca (cordillères Bétiques orientales). Le détachement en position structurale la plus haute sépare les unités Malaguides supérieures des unités Malaguides inférieures, et présente un sens de transport vers le nord-nord-ouest. Ce détachement est basculé par des failles normales listriques, avec un transport vers l’ouest-sud-ouest, qui s’enracinent dans une zone de faille, avec une géométrie de rampe et plat dans le complexe Alpujarride. Ces failles normales à faible pendage ont aminci les complexes Malaguide et Alpujarride du domaine crustal d’Alboran, contribuant à la formation du Bassin « paléo-alboran » au Miocène inférieur–moyen, et ont ensuite été exhumées au cœur d’un anticlinal Miocène supérieur. **Pour citer cet article :** G. Booth-Rea et al., *C. R. Geoscience 334 (2002) 557–563*. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

domaine crustal d’Alboran / cordillères Bétiques orientales / complexe Malaguide / complexe Alpujarride / tectonique extensive

Version abrégée

1. Introduction

La coexistence de structures extensives et compressives de grande échelle dans les orogènes est maintenant généra-

lement acceptée [7]; elle constitue une des caractéristiques de la chaîne Bétique [2, 4, 5]. La nature extensive ou compressive des failles à angle faible, qui constituent les limites entre les différentes unités tectoniques du domaine crustal d’Alboran, ou Zones internes bétiques, reste cependant sujet à débat.

* Correspondence and reprints.
E-mail addresses: gbooth@ugr.es (G. Booth-Rea),
jazonon@ugr.es (J.M. Azañón).

Contrairement aux Bétiques centrales et occidentales, où les unités Alpujarrides ont été décrites comme des unités allochtones extensives [6, 8, 15], dans la zone étudiée (Bétiques nord-orientales), l'unique zone de cisaillement extensive décrite est la limite entre les complexes Malaguide et Alpujarride [1, 11]. Cependant, les contacts entre les unités Malaguides ont été interprétés comme des chevauchements [10, 11, 13, 14].

Notre étude montre que, dans cette zone, la limite Malaguide–Alpujarride présente une géométrie complexe, due à la superposition de deux systèmes extensifs orthogonaux, qui amincissent fortement les deux complexes. Ces systèmes extensifs sont formés par des détachements à faible angle et des éventails listriques, qui constituent les contacts actuels entre les écailles Malaguides. Le système extensif le plus récent, avec un sens de transport vers le sud-ouest, affecte le complexe Alpujarride, provoquant l'extension des unités Alpujarrides supérieures pendant le Serravallien. Le régime compressif durant le Tortonien a plissé et soulevé les systèmes extensifs, en les exhumant au cœur d'antiformes de direction ENE–WSW.

2. Cadre géologique

Le domaine crustal d'Alboran, socle du bassin néogène d'Alboran, apparaît respectivement dans la Sierra de las Estancias, la Sierra de la Tercia et la Sierra Espuña (Fig. 1). Il est formé dans cette zone, de haut en bas, par des unités des complexes Malaguide et Alpujarride. Ces deux complexes étaient considérés comme des empilements de nappes séparées par des contacts majeurs chevauchants [10, 13]. Cet empilement de nappes montre une augmentation progressive du degré de métamorphisme vers sa base, depuis des conditions diagénétiques dans les unités Malaguides supérieures jusqu'au faciès schiste vert dans les unités Alpujarrides [11, 17], qui a été attribuée à l'empilement de nappes initial [2, 4, 11]. Récemment, le contact entre les complexes Malaguide et Alpujarride a été réinterprété comme un détachement extensif, qui a évolué de conditions ductiles à fragiles pendant le Miocène inférieur, avec des roches affectées par un métamorphisme épizonal à son mur et des unités soumises à des conditions diagénétiques ou anchizontales à son toit [1, 3, 11, 19]. Les critères cinématiques en relation avec ce détachement indiquent un transport vers l'est-nord-est dans la Sierra de las Estancias et vers le nord-ouest dans la Sierra Espuña [11]. D'après Lonergan et Platt [11], ce contact extensif sépare deux empilements de chevauchements plus anciens, et a été lui-même plissé par un raccourcissement postérieur au Miocène moyen.

3. Structure de la région

Des écailles tectoniques appartenant aux complexes Malaguide et Alpujarride affleurent dans la région étudiée, dans le cœur de l'anticlinal de la Sierra de la Tercia (Figs. 1 et 2). Nous avons divisé les écailles en trois groupes, en nous basant sur leur position structurale, leur degré métamorphique et leur fabrique pétrographique, dans les termes péliques. De bas en haut, on trouve les unités Alpujar-

rides, métamorphisées dans le faciès schiste vert, les unités Malaguides inférieures, métamorphisées dans des conditions anchizontales, et les unités Malaguides supérieures qui ont subi la diagenèse [11, 17]. Ces écailles tectoniques correspondent à d'anciennes nappes, qui incluent normalement deux formations lithologiques : l'une est quartzopélique, d'âge Permo-Triasique, l'autre est carbonatée, d'âge Triasique [10, 13, 18]. Les unités Malaguides supérieures, dans la position structurale la plus élevée, comprennent également une formation de *grauwackes* d'âge Dévono-Carbonifère et une couverture sédimentaire, d'âge Paléogène à Néogène inférieur [14, 18].

Les caractéristiques principales des formations et des unités présentes dans cette zone sont la morphologie en lentilles mises en place en conditions fragiles, leurs variations latérales d'épaisseur et les fréquentes omissions stratigraphiques (Fig. 2). La plupart des écailles ont une structure interne ductile, qui ne présente pas de relations avec les zones de failles fragiles qui les limitent et qui sont sécantes par rapport aux surfaces de références internes (foliation et stratification). Ces zones de failles cassantes ont été interprétées comme des failles normales à faible angle (FNFA), pour les raisons suivantes :

- (1) ces failles recoupent les surfaces internes de référence des unités, en descendant dans la séquence dans le sens du transport ; ceci s'observe à toutes les échelles, de l'affleurement à l'ensemble cartographique (coupe A–A', Fig. 2) ;
- (2) il existe des sauts de métamorphisme de part et d'autre des FNFA les plus importantes, du faciès schiste vert au faciès d'anchizone supérieure, entre les unités Alpujarrides et Malaguides inférieures, et de l'anchizone inférieure aux conditions diagénétiques, entre les unités Malaguides inférieures et supérieures ;
- (3) les critères cinématiques associés aux FNFA sont les structures S–C' fragiles dans les cataclases foliées, des *slickensides* sur les surfaces de failles et des queues de porphyroclastes asymétriques dans les brèches de failles foliées.

La plupart des FNFA montrent un sens de transport vers l'ouest ou le sud-ouest (voir vecteurs cinématiques sur la Fig. 2, chaque vecteur est une moyenne d'au moins cinq mesures). Les FNFA, qui constituent la limite entre les unités Malaguides supérieures et inférieures, montrent généralement un sens de transport vers le nord ou le nord-ouest.

Le système extensif, avec un transport vers l'ouest-sud-ouest, est formé par un certain nombre de FNFA et d'éventails listriques, qui s'enracinent dans un détachement basal, avec une géométrie de plat et rampe dans le complexe Alpujarride.

Les deux plus hautes FNFA sont situées dans les unités Malaguides inférieures et sont recoupées et basculées par des failles listriques, avec leur propre cinématique, qui s'enracinent dans le détachement basal. Le détachement basal présente un plat dans la partie est de la zone étudiée, coïncidant avec le contact entre les complexes Malaguide et Alpujarride, et descend vers le sud-ouest, avec une géométrie de rampe dans la partie ouest de la zone (coupe A–A', Fig. 2).

Les FNFA les plus récentes sont des failles hors séquence, avec un transport vers le sud-ouest, qui présentent des rampes frontales et latérales, avec un pendage de 30–35°. Ces FNFA recoupent et basculent les failles décrites précédemment et font disparaître à l’affleurement l’écaille Malaguide la plus basse, dans la partie la plus occidentale de la Sierra de la Tercia (coupes A–A’ et B–B’, Fig. 2).

Ces structures extensives se trouvent à présent dans le cœur de l’anticlinal de la Sierra de la Tercia, qui plisse le socle du domaine crustal d’Alboran et la couverture sédimentaire néogène. Les sédiments d’un premier cycle (Serravallien supérieur–Tortonien) ont été basculés avant d’être recouverts en discordance par les dépôts du Tortonien plus élevé. L’ensemble a été plissé ultérieurement, ce qui atteste la croissance progressive du pli anticlinal. Le raccourcissement a continué au Plio-Quaternaire, en relation avec l’activité de la faille décrochante sénestre d’Alhama de Murcia, qui recoupe la Sierra de la Tercia sur sa bordure sud-est.

4. Discussions et conclusions

Les structures extensives trouvées dans les Bétiques nord-orientales ne sont pas seulement présentes au contact entre les complexes Malaguide et Alpujarride ; elles affectent l’empilement initial des nappes Malaguides–Alpujarrides à tous les niveaux structuraux, pénétrant au-dessous (complexe Alpujarride) du détachement extensif défini par les auteurs précédents dans les sierras adjacentes.

Ces systèmes extensifs sont constitués par des détachements à faible angle, avec une géométrie de rampe et plat et des éventails listriques associés ; ils ont oblitéré la relation originale entre les chevauchements et la structure interne des nappes, en amincissant fortement celles-ci. Les FNFA forment les contacts actuels entre les écailles Malaguides, qui doivent être considérées dans leur état actuel comme des unités allochtones extensives.

Le système de FNFA le plus ancien s’enracine entre les unités Malaguides supérieures et inférieures et présente un sens de transport vers le nord-ouest. La famille de FNFA la plus récente, formée de divers détachements à des niveaux structuraux variés, présente un sens de transport tectonique vers l’ouest-SSW. Les dernières FNFA, avec un sens de cisaillement vers l’ouest-sud-ouest étaient actives, au moins pendant le Serravallien inférieur, et elles ont été scellées par des conglomérats d’âge Serravallien supérieur–Tortonien inférieur. Ces sédiments sont eux-mêmes recoupés par des FNFA avec un sens de transport vers le sud-ouest, dans la partie la plus occidentale de la Sierra de la Tercia.

Ces systèmes ont été exhumés pendant le Miocène au cœur de l’anticlinal de la Sierra de la Tercia. Le raccourcissement postérieur est accommodé, pendant le Miocène supérieur et le Plio-Quaternaire, à la bordure sud-est de cette sierra, par des failles transpressives, comme la faille décrochante sénestre d’Alhama de Murcia, de direction NE–SW.

1. Introduction

The coexistence of large-scale contractional and extensional structures in orogenic chains is now generally accepted [7], and is one of the characteristic features of the Betic Chain [2, 4, 5]. Although presently, a matter of discussion in this area is the contractive or extensional nature of the low-angle faults that constitute the boundaries between the different tectonic units of the Alboran crustal domain or Internal Zones of the Betics. In contrast with the Central and Western Betics where the Alpujarride units have been described as allochthonous extensional units [6, 8, 15], in the investigated area (Lorca, north-eastern Betics), the only described extensional shear zone has been the boundary between the Alpujarride and Malaguide complexes [1, 11]. Meanwhile the contacts between the Malaguide units have been interpreted as thrusts [10, 11, 13, 14].

This paper shows that in this area the Alpujarride–Malaguide boundary has a complex geometry because of the interference of two orthogonal extensional systems that strongly attenuate both complexes. These extensional systems are formed by low-angle detachments and listric fans, which constitute the present contacts between the Malaguide thrust sheets. The

most recent extensional system, with southwestern tectonic transport, cuts down into the Alpujarride complex, strongly thinning the highest Alpujarride unit during the Serravallian. Tectonic shortening during the Tortonian folded and uplifted the extensional systems from below the sedimentary cover in the core of ENE oriented antiforms.

2. Geological setting

The Alboran crustal domain, basement of the Neogene Alboran basin, outcrops in the Sierra de las Estancias, Sierra de la Tercia and Sierra Espuña, respectively (location map, Fig. 1). It is formed in this area by units of the Malaguide and Alpujarride complexes, from top to bottom, respectively. Both complexes have been considered as thrust stacks separated by a major thrust surface [10, 13]. This thrust stack shows a progressively higher metamorphic grade towards its base, from diagenetic conditions in the Upper-Malaguide units to greenschist facies in the Alpujarride units [11, 17] that has been attributed to the initial thrust-sheet stacking event [2, 4, 11]. Recently, the contact among the Alpujarride and Malaguide complexes has been reinterpreted as an extensional de-

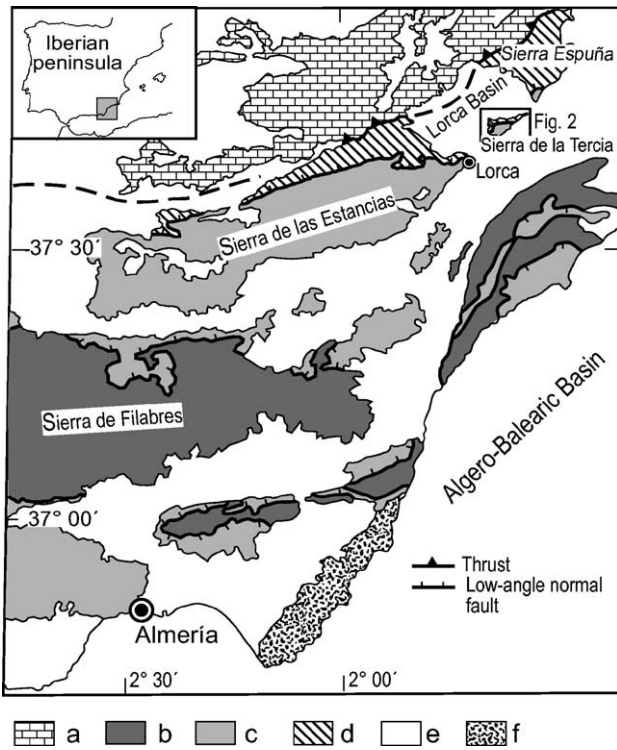


Figure 1. Geological setting of the studied area. Legend. (a) External Betic units. Alboran crustal domain: (b) Nevado-Filabride Complex, (c) Alpujarride complex, (d) Malaguide complex, (e) Neogene and Quaternary sediments, (f) Neogene volcanic rocks.

Figure 1. Cadre géologique de la zone étudiée. Légende. (a) Domaine bétique externe. Domaine crustal d'Alboran : (b) complexe Névalo-Filabride, (c) complexe Alpujarride, (d) complexe Malaguide, (e) sédiments néogènes et quaternaires, (f) roches volcaniques néogènes.

tachment that evolved from ductile to fragile conditions during the Lower Miocene, with rocks affected by epizonal metamorphism in the footwall and diagenetic or anchizone units in the hangingwall [1, 3, 11, 19]. The kinematic criteria related to this extensional detachment indicate tectonic transport towards the east-northeast in the Sierra de las Estancias and towards the northwest in Sierra Espuña [11]. According to Lonergan and Platt [11], this extensional contact separates two older thrust stacks, having been folded itself with further shortening during the Middle Miocene and Late Neogene.

3. The Alboran domain units in the studied area

Tectonic slices, belonging to the Malaguide and Alpujarride complexes, outcrop in the core of the Sierra de la Tercia antiform. Based on their structural position, metamorphic degree and petro-fabric, acquired by their pelitic members, we have divided the tectonic slices in three groups. From bottom to top, they are the Alpujarride units, metamorphosed under

lower-greenschist facies, the Lower-Malaguide units metamorphosed under anchizone conditions and the Upper-Malaguide units that have been submitted to diagenesis [11, 17] (Fig. 2).

These tectonic slices correspond to former thrust sheets that normally include two lithologic units: Permo-Triassic quartz-pelites and Triassic carbonates [10, 14, 18]. The structurally-highest Upper-Malaguide units also comprise a grauwacke formation of Devonian-Carboniferous age and a Palaeogene to Lower-Miocene sedimentary cover [10, 18].

The Alpujarride complex is constituted by two units, i.e., from bottom to top: the Pintada and Cortada units (Fig. 2), which are separated by carbonate mylonites, with a NNW-trending stretching lineation.

The Lower Malaguide units have been grouped by previous authors in two units, the Castellarejo unit [10, 12, 18], correlated with the Santa-Yechar unit of Sierra Espuña [10] and metamorphosed under higher-anchizone conditions [11, 17] and the Arcon unit, correlated with the Morrón-Largo unit of Sierra Espuña [10, 14] and metamorphosed under lower-anchizone conditions [11, 17]. The Arcon unit is formed by several tectonic slices, representative of previous thrust sheets.

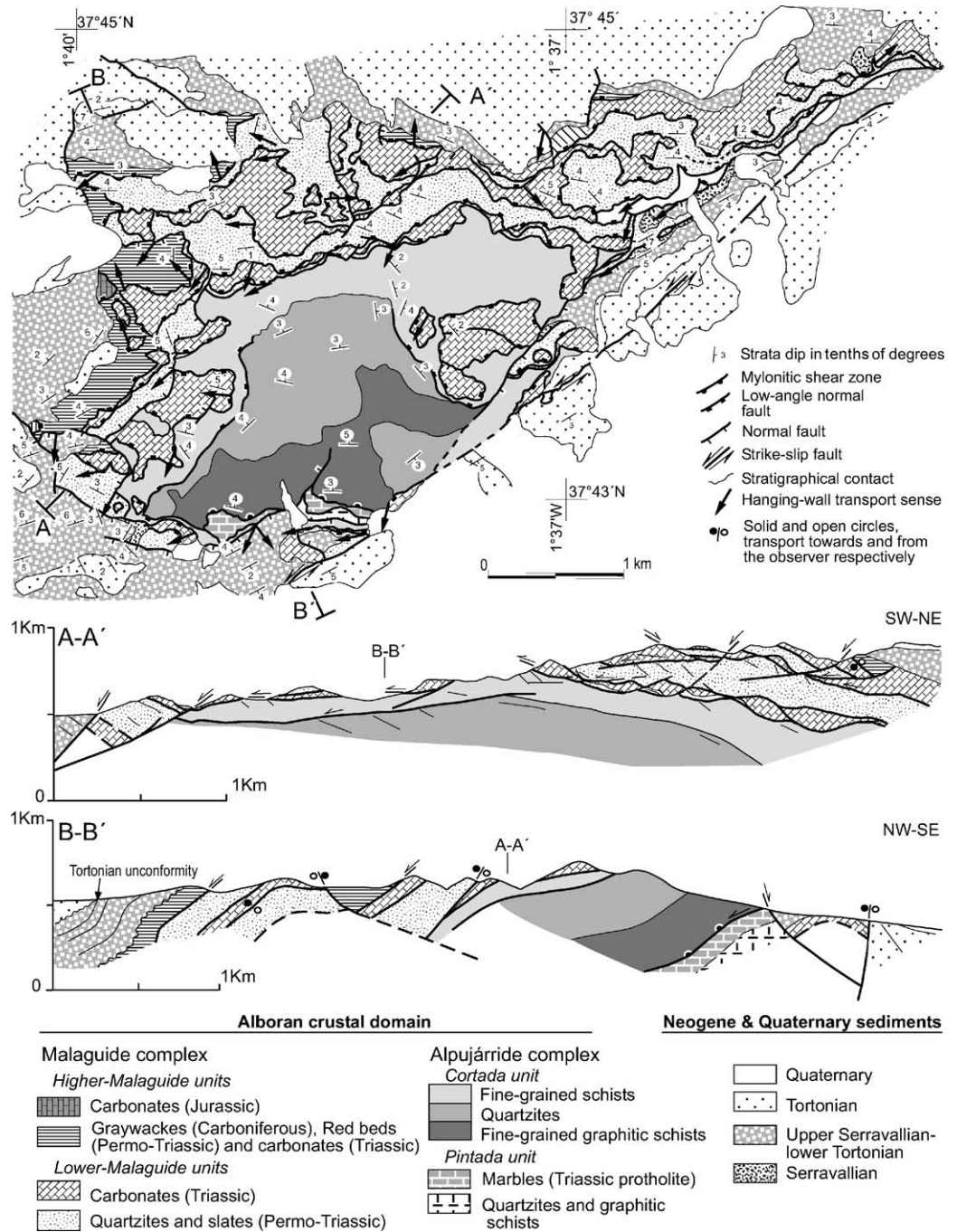
The Upper Malaguide is represented in the study area by the Jurramienta unit, which shows several extremely thin tectonic slices.

4. Extensional structures in the basement of the Lorca Basin

The most striking characteristic of the pre-Tortonian units and formations of the Alboran domain that outcrop in the study area is their fragmentation in lenticular bodies, generated by cataclastic deformation, so that all the units and lithological formations are affected by lateral thickness variations and stratigraphical omissions (cross section A–A', Fig. 2).

Most of the tectonic slices have a ductile internal structure that holds no relation with the fragile fault zones that limit them; they are secant to the internal reference surfaces (foliation or stratification). These fault zones have been folded by a Late-Neogene open fold and they dip towards the northwest or the west-northwest in the northern part of the Sierra de la Tercia, of the same as the Miocene sediments that seal them (cross section B–B', Fig. 2). Viewed along the Sierra de la Tercia fold hinge, the fault zones are gently dipping surfaces, with ramp-flat geometry (see geological sections, Fig. 2).

These faults have been interpreted as low-angle normal faults (LANF) as they cut the internal reference surfaces of the units, down section in the slip direction. This was observed at all scales, from outcrop to map scale (cross section A–A', Fig. 2). Generally,



the footwall ramps affect the carbonate lithologies and the flats are localised in the contact between pelitic and carbonate formations, indicating that the contrasting rheology is a key factor in the LANFs geometry.

The LANFs activity has resulted in a distributed fragile thinning of the previous thrust stack, which has respected the structural position of the tectonic units and the metamorphic zonation, so that the major LANFs separate brecciated-rock volumes with differentiated tectono-metamorphic characteristics.

The fault rocks found along the LANFs vary from foliated cataclasites and ultracataclasites to cemented

breccias and fault gouge. Frequently the foliated cataclasites are found as pods in a fault-gouge matrix. The rocks adjacent to the LANFs show different deformation styles, depending on their lithology. The quartzitic rocks range from crush breccias (less than 5% matrix) to fault gouge in small satellite faults. They show several sets of vertical joints and quartz-calcite veins. The pelitic rocks are cut by several sets of fragile spaced extensional-crenulation cleavages. Quartz + calcite + chlorite stepped fibres have grown on these shear surfaces, indicating a normal movement. The fault rocks and the other extensional struc-

tures show an evolution towards shallower formation conditions.

Most of the LANFs show westward or southwestward tectonic transport, and the LANFs that constitute the boundary between the Upper- and Lower-Malaguide units show mostly northwestward or northward tectonic transport (see kinematic vectors in Fig. 2; each vector is an average of at least five measurements).

4.1. West-southwest extension

The extensional system with transport towards the west-southwest is formed by several detachment faults and listric fans, that sole in a LANF with ramp-flat geometry in the Alpujarride complex. The two-higher detachments are located in the Lower-Malaguide units and have been cut and rotated by listric faults with their same kinematics that sole in the basal detachment. The basal detachment has a flat geometry in the eastern part of the studied area, coincident with the contact between the Alpujarride and Malaguide complexes and then cuts the Alpujarride complex down-section towards the southwest in the western part of the studied area (geological section A–A' in Fig. 2).

This extensional system has produced isolated extensional horses in the Triassic formations of the Lower-Malaguide units, by the formation of new high-extension sole faults [9] or by the activity of out-of-sequence listric faults (cross section A–A' in Fig. 2). Frequent counter faults with northeastern transport sense thin the hangingwall rollovers produced by these out-of-sequence listric faults. Faulting along the southwest transport listric faults has produced a general tilting of the previous key surfaces (foliation or stratification) towards the northeast, especially in the Lower-Malaguide units (geological map, Fig. 2).

The most recent southwestern transport LANFs are out-of-sequence faults that show frontal and lateral ramps, with a dip angle of 30–35°. These LANFs cut and tilt the faults described above and omit the lowest Malaguide thrust sheet, in the western end of Sierra de la Tercia (cross section A–A' and B–B', Fig. 2).

4.2. North-northwest extension

The extensional character of the detachment between the Higher- and Lower-Malaguide units is not as clear as in the previous ones, as its outcrops are smaller and more fragmented, although we have interpreted this detachment as an extensional one that has accommodated extension of the Upper-Malaguide units. These units are formed at least by three tectonic slices, with a thickness of 100 m, and in some cases their Permo-Triassic formations are formed greatly

by fault-gouges and breccias. The more competent lithologies of these units (quartzites and dolostones) outcrop as lenses separated by trails of fault breccias in a highly comminuted pelitic matrix.

5. Neogene sediments and the age of extensional systems

The LANFs with west-southwestern transport affect marine marls and conglomerates identified in small outcrops, especially in the southeastern border of the Sierra de la Tercia (Fig. 2). These sediments contain foraminiferal associations of Upper-Serravallian age (F. Serrano, personal communication).

Most of the southwestern transport LANFs are sealed by red continental conglomerates that are overlain by Tortonian limestones [16]. So the age of these conglomerates, between the Upper Serravallian and the Tortonian, brackets the upper-activity limit of most of the southwestern-transport LANFs. Although in the western border of Sierra de la Tercia, these conglomerates are faulted and tilted by the southwestern transport out-of-sequence LANFs (cross section A–A', indicating that Fig. 2), extensional tectonics prevailed until the Tortonian.

The older northern-transport LANFs have not been dated, although, as discussed by Lonergan and Platt [11], they must have a Lower Miocene age. This coincides with the fission-track age of the first metamorphic clasts found in the sedimentary cover [12].

These extensional structures are presently found in the core of the Sierra de la Tercia anticline, that folds the Alboran basement and the Neogene sedimentary cover. The first angular unconformity related with the growth of this fold is intra-Tortonian [16], although the younger Tortonian sediments are themselves folded. Further folding and uplift proceeded during the Pliocene–Quaternary, related with the activity of the Alhama-de-Murcia sinistral strike-slip fault that cuts the southeastern border of Sierra de la Tercia.

6. Discussion and conclusions

The extensional structures found in the northeastern Betics are present not only in the contact between the Malaguide and Alpujarride complexes, but they also affect the previous Malaguide–Alpujarride thrust stack pervasively at all structural levels, penetrating in the foot wall (Alpujarride complex) of the extensional detachments defined by previous authors in the adjacent Estancias and España sierras.

These extensional systems are constituted by low-angle detachments with ramp-flat geometry and as-

sociated listric fans that have obliterated the original relationship between the thrusts and the thrust-sheet structure, strongly thinning the thrust stack. The LANFs constitute the present contacts between the Malaguide thrust sheets, which should be considered as allochthonous extensional units.

The most recent family of LANFs, formed by several detachments at different structural levels has a west-southwest transport sense. The oldest LANF system detaches between the Upper- and Lower-Malaguide units and exhibits tectonic transport towards the northwest.

The LANFs with west-southwest-shear sense were active in this area at least during the Serravallian, and were sealed by Upper-Serravallian to Lower-Tortonian conglomerates, sediments that are themselves faulted by out-of-sequence southwestern transport LANFs in the western end of Sierra de la Tercia.

The southwestern transport found in the detachment between the Malaguide and Alpujarride complexes differs from the kinematics described for this

contact in the Estancias and Espuña sierras. In the Sierra de las Estancias, this contact has a northeastern-transport sense and in Sierra Espuña it has a northwestern transport sense [11]. This illustrates the complexity of the extensional processes in this area, where Lower-Miocene ductile–brittle detachments as those outcropping in the Sierra de las Estancias and in the Sierra Espuña [11] have been omitted in Sierra de la Tercia by Middle-Miocene southwestern-transport LANFs.

These extensional systems have been folded during the Upper Miocene, and presently outcrop in the core of the Sierra de la Tercia anticline. This renewed contractive regime manifests itself also by the formation of an angular unconformity at the basal part of the Tortonian sedimentary cover, and evolves during the Late Miocene and Pliocene–Quaternary, towards a transpressive regime, most of the deformation being accommodated along the northeast-trending sinistral Alhama de Murcia strike-slip fault.

Acknowledgements. The CICYT Spanish projects REN2001-3868-CO3-01/MAR, REN2001-3378, and FEDER funds of the UE supported the field and laboratory research. François Negro translated the French version.

References

- [1] F. Aldaya, F. Alvarez, J. Galindo Zaldívar, F. González Lodeiro, A. Jabaloy, F. Navarro-Vilá, The Malaguide–Alpujarride contact (Betic Cordilleras, Spain): a brittle extensional detachment, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 313 (1991) 1447–1453.
- [2] J.M. Azañón, A. Crespo-Blanc, V. García-Dueñas, Continental collision, crustal thinning and nappe-forming during the Pre-Miocene evolution of the Alpujarride Complex (Alborán Domain, Betics), *J. Struct. Geol.* 19 (1997) 1055–1071.
- [3] T.W. Argles, J.P. Platt, D.J. Waters, Attenuation and excision of a crustal section during extensional exhumation. The Carratraca Massif, Betic Cordillera, southern Spain, *J. Geol. Soc.* 156 (1999) 149–162.
- [4] J.C. Balanyá, V. García-Dueñas, J.M. Azañón, M. Sánchez-Gómez, Alternating contractional and extensional events in the Alpujarride nappes of the Alboran Domain (Betics, Gibraltar Arc), *Tectonics* 16 (1997) 226–238.
- [5] C.J. Balanyá, V. García-Dueñas, J.M. Azañón, M. Sánchez-Gómez, Reply, *Tectonics* 17 (1998) 977–981.
- [6] A. Crespo-Blanc, M. Orozco, V. García-Dueñas, Extension versus compression during the Miocene tectonic evolution of the Betic chain. Late folding of normal fault systems, *Tectonics* 13 (1994) 78–88.
- [7] J.F. Dewey, Extensional collapse of orogens, *Tectonics* 7 (1988) 1123–1139.
- [8] V. García-Dueñas, J.C. Balanyá, J.M. Martínez-Martínez, Miocene extensional detachments in the outcropping basement of the Northern Alboran Basin (Betics) and their tectonic implications, *Geo-Mar. Lett.* 12 (1992) 88–95.
- [9] A.D. Gibbs, Structural evolution of extensional basin margins, *J. Geol. Soc. London* 141 (1994) 609–620.
- [10] W. Kampschuur, C.W. Langenberg, J.A. Espejo, A. Crespo, R. Pignatelli, Mapa geológico y minero de España, 953 (Lorca), IGME, Madrid, 1972.
- [11] L. Lonergan, J. Platt, The Malaguide–Alpujarride boundary: a major extensional contact in the Internal Zone of the eastern Betic Cordillera, SE Spain, *J. Struct. Geol.* 17 (1995) 1665–1671.
- [12] L. Lonergan, C. Johnson, Reconstructing orogenic exhumation histories using synorogenic detrital zircons and apatites: an example from the Betic Cordillera, SE Spain, *Basin Res.* 10 (1998) 353–364.
- [13] G.H. Mäkel, Differences in tectonic evolution of superimposed Malaguide and Alpujarride tectonic units in the Espuña area (Betic Cordilleras, Spain), *Geol. Mijnbouw* 60 (1981) 203–208.
- [14] G.H. Mäkel, H.E. Rondeel, Differences in the stratigraphy and metamorphism between superposed Malaguide and Alpujarride units in the Espuña area (Betic Cordilleras, SE Spain), *Estud. Geol.* 35 (1979) 109–117.
- [15] J.M. Martínez-Martínez, J.M. Azañón, Mode of extensional tectonics in the southeastern Betics (SE Spain). Implications for the tectonic evolution of the peri-Alborán orogenic system, *Tectonics* 16 (1997) 205–225.
- [16] C. Montenat, P. Ott d’Estevou, T. Delort, Le bassin de Lorca, in: C. Montenat (Ed.), *Les bassins néogènes du Domaine bétique oriental (Espagne)*, Doc. et Trav. IGAL, Paris, 12–13, 1991, pp. 261–280.
- [17] F. Nieto, N. Velilla, D.R. Peacor, M. Ortega-Huertas, Regional retrograde alteration of sub-greenschist facies chlorite to smectite, *Contrib. Mineral. Petrol.* 115 (1994) 243–252.
- [18] J. Paquet, Étude géologique de l’Ouest de la province de Murcia, *Mém. Soc. géol. France* 48 (1969) 1–270.
- [19] J.M. Tubía, F. Navarro-Vilá, J. Cuevas, The Malaguide–Los Reales Nappe: an example of crustal thinning related to the emplacement of the Ronda peridotites (Betic Cordillera), *Phys. Earth Planet. Int.* 78 (1993) 343–354.