

Stratigraphy / Stratigraphie

Surface Geosciences / Géosciences de surface  
(Palaeoenvironment / Paléoenvironnement)

# New data on Lower Carboniferous stratigraphy and palaeogeography of the Malaguide Complex (Betic Cordillera, Southern Spain)

Luis O'Dogherty<sup>a\*</sup>, Rosario Rodríguez-Cañero<sup>b</sup>, Hans-Jürgen Gursky<sup>c</sup>, Agustín Martín-Algarra<sup>d</sup>, Martial Caridroit<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Dpt. Geología, CASEM, Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Spain

<sup>b</sup> I.E.S. Huelin, c/Tomás Echeverría 2, 29002 Málaga, Spain

<sup>c</sup> Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstr. 10, 38678 Clausthal Zellerfeld, Germany

<sup>d</sup> Dpt. Estratigrafía y Palaeontología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain

<sup>e</sup> Laboratoire de paléontologie, université des sciences et technologies de Lille (Lille-1), 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

Received 17 August 2000; accepted 4 September 2000

Communicated by Michel Durand-Delga

**Abstract** – The Malaguide basement is formed by a thick, strongly deformed but weakly metamorphosed sedimentary succession of ?Ordovician–Carboniferous age, mainly made of basinal mudstones and turbidites, which includes a thin but conspicuous Lower Carboniferous chert–limestone interval (Falcoña formation). The chert member (ribbon radiolarites) yielded, for the first time in Southern Spain, Tournaisian radiolarians. The Viséan age of the limestone member is refined by conodonts. This formation is related to a period of generalized pelagic sedimentation, caused by relatively high sea level, low clastic input and high equatorial productivity, which preceded the closure of the Palaeotethys basins due to the Variscan orogeny. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**radiolarians / conodonts / Viséan / Tournaisian / palaeogeography / Palaeotethys / Betic internal zones**

**Résumé** – **Nouvelles données sur la stratigraphie et la paléogéographie du Carbonifère inférieur des Malaguides (cordillère Bétique, Espagne méridionale).** Le socle des Malaguides est formé par une épaisse succession grésopélique d'âge ?Ordovicien–Carbonifère, fortement tectonisée, légèrement métamorphique et principalement constituée de pélites de bassin et de turbidites, dans laquelle un remarquable et mince intervalle silico-carbonaté d'âge Carbonifère inférieur (formation Falcoña) est bien exprimé. Les cherts (lydiennes) ont fourni pour la première fois des radiolaires du Tournaisien. Les conodontes des calcaires supérieurs ont permis de dater le Viséen. Cette formation est liée à une période de sédimentation pélagique généralisée, due à la montée eustatique, à la diminution des clastiques et à la forte productivité équatoriale qui ont précédé la fermeture de la Paléotéthys à la suite de l'orogénèse varisque. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**radiolaires / conodontes / Viséen / Tournaisien / paléogéographie / Paléotéthys / zones internes bétiques**

\* Correspondence and reprints.

E-mail addresses: lodogher@merlin.uca.es (L. O'Dogherty), UEI0657147300@eurociber.es (R. Rodríguez-Cañero), gursky@geologie.tu-clausthal.de (H.J. Gursky), agustin@goliat.ugr.es (A. Martín-Algarra), Martial.Caridroit@univ-lille1.fr (M. Caridroit).

## Version abrégée

### 1. Introduction

Le Carbonifère inférieur est caractérisé par une très forte homogénéisation paléocéanographique dans la plupart des bassins marins européens, juste avant l'orogénèse varisque [6]. Ce phénomène est enregistré dans les bassins sédimentaires par un important développement de la sédimentation radiolaritique. Un intervalle à sédimentation siliceuse très riche en radiolaires (lydiennes) est aussi constaté dans les Malaguides bétiques [4, 5, 15]. Ces radiolarites constituent le membre inférieur de la formation Falcoña [10, 11], non daté directement jusqu'à présent, et couronné par des calcaires pélagiques à conodontes [21, 22]. De nouvelles données stratigraphiques, paléontologiques et pétrographiques sur cette formation nous ont permis de la dater du Tournaisien–Viséen, d'évaluer la durée de la sédimentation siliceuse et le début du dépôt des flyschs synorogéniques (faciès Culm) et de préciser la paléogéographie du Carbonifère inférieur.

### 2. Cadre géologique et stratigraphie

La zone étudiée se situe dans la partie ouest des Montes de Málaga, au nord-ouest de cette ville (*figure 1A*), dans le plus grand affleurement des Malaguides (nappes supérieures des zones internes bétiques). Leur socle paléozoïque est formé principalement par une série grésopélimitique avec des intercalations de conglomérats, calcaires pélagiques et radiolarites, dans laquelle on reconnaît, de bas en haut, les formations Morales, Santi Petri, Falcoña, Almogía et Marbella (*figure 1B*).

La formation Morales (pré-Silurien) est une succession de plusieurs centaines de mètres de schistes, parfois à débit ardoisier, et de grauwackes fines, contenant à sa partie supérieure quelques lentilles de conglomérats à galets quartzitiques très étirés. La formation Santi Petri, attribuée au Dévonien, est formée par des turbidites carbonatées à grain très fin et fortement plissées (Calizas Alabeadas), des grauwackes et des pélites. La formation Morales et, plus localement, les formations Santi Petri et Falcoña, sont recoupées par un système de dykes de roches mafiques provenant d'un magmatisme tholéitique d'arc, d'âge Miocène inférieur [26]. La formation Falcoña, d'environ 20 m d'épaisseur, est formée par un membre inférieur siliceux (lydiennes ou radiolarites) et par un membre supérieur carbonaté (calcaires à conodontes) [10]. La formation Almogía est un flysch grésopélimitique non daté, avec des conglomérats et des grauwackes à grain grossier dans sa partie inférieure (membre Retamares), qui contient aussi des blocs allochtones dispersés de calcaires pélagiques à fossiles du Silurien–Dévonien [14, 21]. La formation Marbella est un conglomérat à gros galets ravinant les formations sous-jacentes. Les galets de calcaires dans

les conglomérats de ces deux dernières formations sont datés du Givétien supérieur–Viséen supérieur (formation Almogía) et du Viséen supérieur–Bashkirien inférieur (formation Marbella) [10, 11, 13].

Dans la région étudiée, la formation Falcoña montre des différences de faciès et d'épaisseur (*figure 1C*).

- Dans les coupes de Cortijo Pechuga, Cortijo Palmarrillo et Casa de Otero : 1) le membre siliceux se situe stratigraphiquement au-dessus de grauwackes verdâtres et de pélites schisteuses ou phylliteuses, localement de couleur rouge ; 2) les lydiennes sont fortement plissées, et les radiolaires aplatis et recristallisés ; 3) les calcaires, d'une dizaine de mètres d'épaisseur, contiennent de fréquents nodules de silex très recristallisé et des crinoïdes déformés ; 4) les bancs de calcaire, plus minces vers le haut, où des niveaux de schistes sont interstratifiés, sont fortement replissés, foliés et marmorisés, prenant parfois un aspect calcschisteux.

- Dans les coupes d'Arroyo Zapateros et de Falcoña : 1) la déformation tectonique est moins intense ; 2) des pélites siliceuses grises à rouges passent graduellement à des radiolarites rougeâtres, qui alternent avec de très fins niveaux pélimitiques ; 3) la couleur de la partie supérieure des radiolarites est noire, les bancs sont un peu plus épais (décimétriques) et ils montrent des intercalations de grauwackes très fines ; 4) les calcaires supérieurs (épais de 2 m au maximum) sont dépourvus de nodules à silex ; 5) le passage à la formation Almogía est marqué par quelques mètres de pélites.

### 3. Les radiolarites

Le membre siliceux de la formation Falcoña montre une succession bien litée et relativement monotone de cherts radiolaritiques de couleur verdâtre à noire (lydiennes) ou, plus fréquemment, de quartzites jaunâtres à brunâtres par altération, séparés par des niveaux très fins d'argile siliceuse. Les couches de chert présentent une épaisseur moyenne de 3 à 6 cm et des contacts très nets. La faune de radiolaires obtenue dans le membre siliceux de la coupe de Falcoña (*figure 2*) a permis de dater ces niveaux du Tournaisien. L'absence d'importants taxa (Albaillelaria, Pylentonemidae et Archocyrtidae), assez communs dans d'autres bassins paléozoïques de Grèce, d'Allemagne et de France (par exemple Massif armoricain, Montagne noire, Vosges) [1, 7, 19, 27], est la conséquence d'une très forte diagenèse avec dissolution de certaines formes [1, 2, 9]. L'âge des radiolarites est confirmé par leur position, dans la coupe Falcoña, au-dessus de couches à blocs riches en Tentaculites du Dévonien et au-dessous de calcaires à conodontes du Viséen, zone à Bilineatus–Commutatus *sensu* Perret [16] (membre supérieur). L'index d'altération de la couleur des conodontes (CAI) est très variable : de 5,5 à 6 dans les coupes Casa Otero, El Palmarrillo et Pechuga, bien que des valeurs de 3 à 3,5 (normales dans la coupe Falcoña) aient été également trouvées dans les mêmes échantillons. Ces dernières

sont probablement les valeurs originales du CAI, tandis que les valeurs élevées résultent de phénomènes d'altération hydrothermale [20, 23].

#### 4. Cadre paléocéanographique et paléogéographique

Des roches siliceuses comparables aux radiolarites étudiées sont typiques dans les successions du Carbonifère inférieur de la Montagne noire [3], du massif du Harz [8, 9], des monts Cantabriques [24], des Pyrénées [18], de la zone Sud-Portugaise [17] et des Alpes orientales [25]. Cet intervalle radiolaritique est lié aux classiques faciès Culm des chaînes varisques européennes, avec une séquence de faciès qui commence par des sédiments pélagiques et se termine par des flyschs à grauwackes. Une évolution stratigraphique comparable se retrouve dans la Montagne noire, les Alpes orientales et les Malaguides. Ces successions ont été déposées dans des bassins marginaux appartenant aux microblocs continentaux dérivés du Gondwana [10, 12]. Pendant le Viséen et le début du Carbonifère supérieur, ces bassins ont reçu une sédimentation clastique, à la suite de l'érosion des reliefs produits au cours de l'orogénèse varisque.

Les radiolarites tournaisiennes de la formation Falcoña représentent un intervalle biogénique déposé pen-

dant une période de montée du niveau de la mer dans un environnement profond au-dessous de la CCD, éloigné des sources de terrigènes, à faible taux de sédimentation (quelques millimètres en 1 000 ans), et localisé dans un bassin tropical de la Paléotéthys méridionale. Peu de terrigènes ont atteint les zones distales du bassin, ce qui, ajouté à la haute productivité des eaux superficielles des océans équatoriaux-tropicaux, est à l'origine des sédiments riches en radiolaires. Dans des conditions profondes à très faible énergie, les radiolaires étaient partiellement redistribués par des turbidites à très faible concentration et/ou par des courants de fond.

Ce bassin sédimentaire de type Culm du Paléozoïque des Malaguides était l'un des divers étroits bassins qui séparaient la Laurussia du Gondwana et les microcontinents entre ces derniers. Pendant le Carbonifère inférieur, plusieurs zones de subduction étaient actives, à la suite de la migration vers le nord du Gondwana et du raccourcissement de la Paléotéthys, jusqu'à sa fermeture définitive au cours du Carbonifère supérieur. Dans les Malaguides, de même que dans d'autres bassins de la Paléotéthys, la fin de la sédimentation siliceuse s'est produite juste avant le début du dépôt des flyschs synorogéniques varisques, ce qui a entraîné une augmentation brutale du taux de sédimentation.

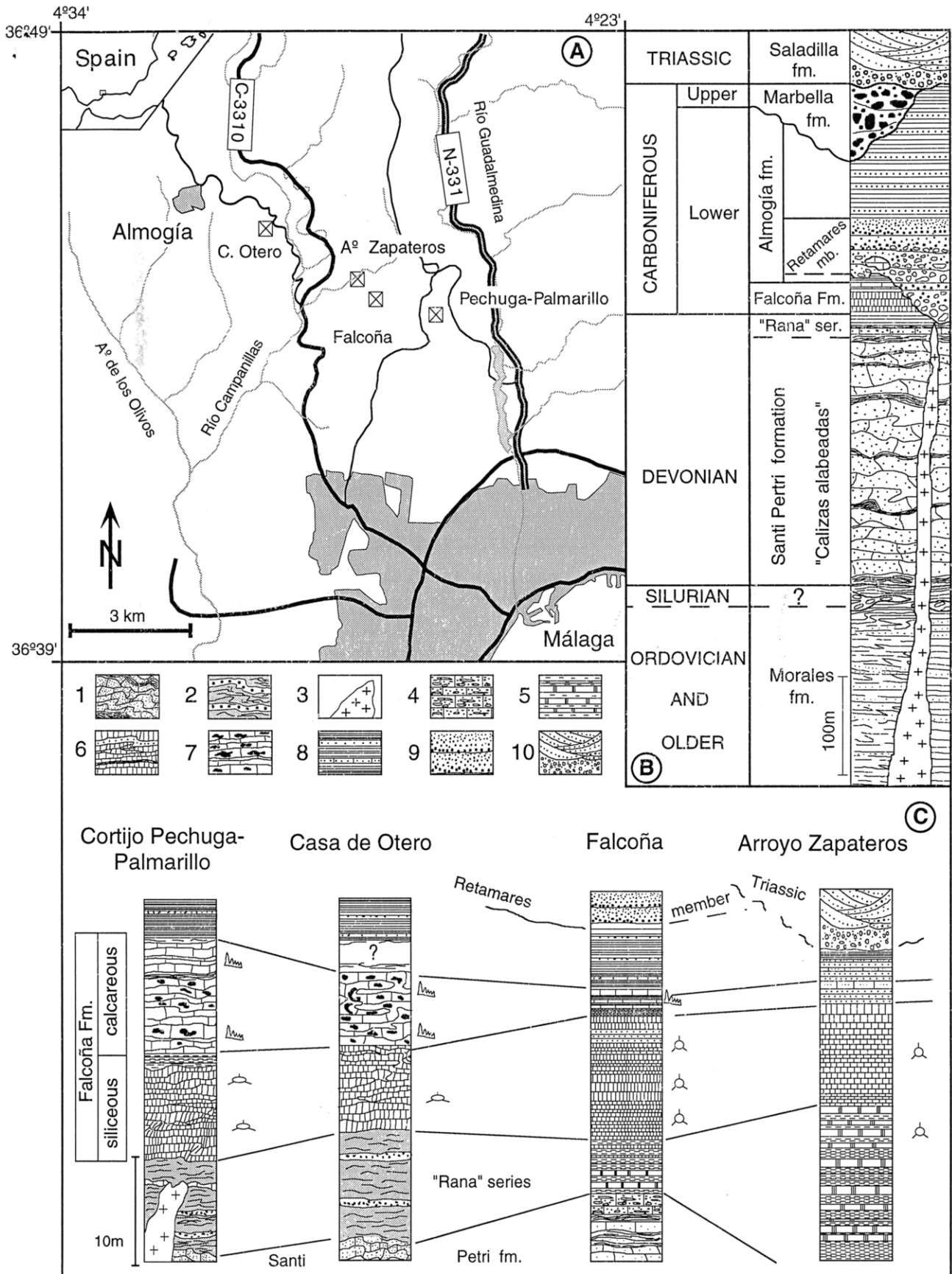
## 1. Introduction

Radiolarian chert units in Late Devonian and Early Carboniferous successions of western and central Europe are useful guide horizons in geological mapping and regional stratigraphic correlation, above all in tectonically complicated areas. Radiolarian chert sedimentation was particularly widespread in the Lower Carboniferous, due to a marked palaeoceanographic homogenisation in most European marine basins (« bathyal lull » of Goldring [6]), just before the onset of the Variscan orogeny. A Lower Carboniferous chert unit, formally defined as a part (undated up to now) of the Falcoña Formation [10, 11] is also present in the Malaguide Complex, Southern Spain [4, 5, 15]. Limestones overlying the cherts contain Viséan conodonts [22]. In this paper we present new stratigraphical, petrographical and palaeontological data on these sediments: for the first time, we date Palaeozoic deposits in the Betic Cordillera by means of radiolarians, and new conodonts are obtained from overlying limestones. These new data allow us to specify the time span of the Early Carboniferous pelagic sedimentation in Southern Spain, the onset of the overlying flysch sedimentation, and the Early Carboniferous palaeogeography in the Malaguide Complex.

## 2. Geological setting and stratigraphy

The study region is located in the western part of the Montes de Málaga, to the northwest of this city (*figure 1A*), in the largest outcrop area of the Malaguide Complex. The latter is the uppermost nappe unit of the Internal Zones of the Betic Cordillera, and it tectonically overlies highly metamorphic rocks and peridotites of the Alpujarride Complex. The Malaguide Complex is formed by a thick, weakly metamorphic to non-metamorphic Palaeozoic basement, unconformably covered by continental red beds of Triassic age and by a thin, stratigraphically incomplete, shallow marine to hemipelagic Jurassic to Aquitanian succession. The Palaeozoic basement consists essentially of slates and greywackes with subordinate intercalations of conglomerate, chert and pelagic limestone. In the Montes de Málaga the following lithostratigraphical units occur, from bottom to top: Morales, Santi Petri, Falcoña, Almogía and Marbella formations (*figure 1B*).

The Morales formation is the lowest outcropping stratigraphical unit of the Malaguide Complex. It is a thick succession of pre-Silurian phyllitic slates and fine-grained greywackes. In its upper part, it includes lenses of tectonically stretched quartz-rich conglomerates. The Santi Petri formation is a thick strongly folded succession of fine-grained calcareous turbidites (Calizas Alabeadas: warped limestones), greywackes and slates of



probable Devonian age. In the study region, the Morales and, locally, the Santi Petri and Falcoña formations were intruded by Early Miocene arc-tholeiitic mafic dykes [26]. The Santi Petri formation is overlain by the Falcoña formation [10, 11] a thin succession of cherts (lower member) followed by conodont-bearing limestones (upper member). The siliceous member develops from underlying pelitic sediments (sometimes called 'Rana Series' [14]). The limestone member is conformably overlain by a thin pelitic succession that is usually considered as the base of the Almogía formation. This is a thick turbiditic succession of greywackes and shales that contains, in its lower part, conglomerates and coarse-grained sandstones (Retamares member) that locally may cut by erosion into the underlying rocks. Isolated allochthonous limestone blocks with Silurian and Devonian orthoceratids, tentaculitids and conodonts [21] are locally present. Thick and very coarse-grained conglomerate lenses (debris flows) of the overlying Marbella formation locally cut deeply down into the Almogía formation. The Almogía and Marbella formations contain limestone clasts dated as Late Givetian to Late Visean (Almogía formation) and Late Visean to Earliest Bashkirian (Marbella formation) [10, 11, 13].

Six localities in four structurally different fold units have been studied and sampled for the purposes of the present study: Cortijo Pechuga and Cortijo de Palmarillo (in the same fold unit), Cortijo Falcoña (two sections), Arroyo Zapateros and Casa de Otero (*figure 1A*). All sections (*figure 1C*) include both members of the Falcoña formation and some differences in facies and thickness are observed.

- In the sections of Cortijo Pechuga, Cortijo Palmarillo and Casa de Otero: 1) the siliceous member overlies greenish greywackes and (locally reddish) slates that develop from typical 'Calizas Alabeadas' facies of the underlying Santi Petri formation; 2) the cherts are strongly folded, and the radiolarians flattened and re-crystallised; 3) the limestone member is several meters thick and it is so intensely refolded that in some places it shows a marble-like aspect; 4) the limestones are micritic and include abundant re-crystallised dark grey chert (and quartz) nodules in some beds, as well as

stretched crinoid articles (Pechuga); 5) towards its stratigraphic top the limestones are thin-bedded and interlayered with slates, having a calc-schist aspect.

- In the Arroyo Zapateros and Falcoña outcrops: 1) the tectonic deformation and re-crystallisation are, in general, less intense; 2) a well-bedded succession of grey to reddish-brownish siliceous mudstones underlies the siliceous member; 3) these mudstones grade upsection into platy thin-bedded (cm to dm) pale greenish to reddish radiolarian cherts with very thin (several millimetres to a few centimetres) clayey partings; 4) the topmost chert beds are black, decimetre-thick and include isolated beds of fine-grained greywacke (southern Falcoña section); 5) the limestone member is less than 2 m thick, consists of decimetre-thick beds without chert nodules, and is interbedded with shales; and 6) a grey-brownish pelitic interval separates the Falcoña formation from overlying rocks of the Almogía formation. In the northern Falcoña section, the transition from the Santi Petri formation to the siliceous mudstone unit underlying the chert member is exceptionally well exposed (*figure 1C*): the uppermost part of the Santi Petri formation is made up of typical thin-bedded turbiditic limestones and mudstones, above which several pebbly mudstone beds are present. These beds consist of unsorted centimetre- to decimetre-thick discoidal, roundish and sub-angular clasts of Devonian limestones set in a dark grey mudstone matrix. The clasts include grey to slightly bluish, fine-grained pelagic limestone with abundant Tentaculites and grey macrofossil-bearing shallow-water limestone with corals, stromatoporoids and bryozoa.

### 3. Chert sedimentology and petrography

The siliceous member of the Falcoña formation is a monotonous succession of chert beds separated by thin layers of siliceous mudstone. The thickness of the members reaches up to 10 m (*figure 1C*), but may be less due to tectonic deformation [4]. In exposures with little tectonic deformation (e.g. Falcoña and Zapateros), the chert beds are greenish and dark grey to black, brittle and mostly between 3–6 cm thick (lower part of the

**Figure 1. A.** Location. **B.** Stratigraphy of the Malaguide Complex in the Montes de Malaga. **C.** Stratigraphic columns, with radiolarians and conodonts. Lithology. **1:** warped, fine-grained calcareous turbidites, slates and greywackes (Santi Petri formation). **2:** greenish (locally reddish) greywackes and slates ('Rana series'). **3:** Early Miocene mafic subvolcanic rocks. **4:** thin-bedded turbiditic limestones and pebbly mudstones with limestone clast (top of Santi Petri formation). **5:** grey to reddish-brownish well-bedded siliceous mudstones. **6:** radiolarian cherts (lower member, Falcoña formation), with greywacke intercalations. **7:** conodont-bearing limestones, sometimes with chert (upper member, Falcoña formation). **8:** olive-green shales with some fine-grained and thin greywacke and sandy calcarenite beds. **9:** medium- to coarse-grained greywackes (Retamares member). **10:** red sandstones and conglomerates (Saladilla formation).

**Figure 1. A.** Localisation. **B.** Stratigraphie des Malaguides des Montes de Malaga. **C.** Colonnes stratigraphiques et niveaux à radiolaires et conodontes. Lithologie. **1:** calcaires turbiditiques contournés, pélites et grauwwackes (formation Santi Petri). **2:** grauwwackes et schistes verdâtres, localement rougeâtres (« série Rana »). **3:** roches subvolcaniques mafiques du Miocène inférieur. **4:** calcaires turbiditiques finement stratifiés et brèches à galets de calcaires (sommets de la formation Santi Petri). **5:** pélites siliceuses litées grises à rougeâtres. **6:** radiolarites (membre inférieur, formation Falcoña) avec des niveaux de grauwwackes. **7:** calcaires micritiques à conodontes, parfois avec des nodules de silex (membre supérieur, formation Falcoña). **8:** pélites vertes avec minces niveaux de grauwwackes et de calcarénites gréseuses. **9:** grauwwackes à grain grossier (membre Retamares). **10:** grès rouges et conglomérats (formation Saladilla).

succession). Slight pinch-and-swallow of the beds occurs in places. The beds have sharp contacts with the under and overlying, millimetre-thin siliceous mudstone interlayers. In places centimetre-thick fine-grained tuffaceous clayey interbeds are present. The chert beds may show well or badly defined, continuous or non-continuous, parallel lamination, but many beds are macroscopically homogeneous. In exposures with stronger tectonic deformation (e.g. Pechuga and Casa de Otero) the chert beds are generally light grey to whitish, internal lamination may vanish and their thickness is reduced to 2 cm or less, giving a varve-like aspect due to tectonic flattening. Very strong tectonic deformation and weathering may lead to a nearly massive, quartzite-like aspect with yellowish-brownish colours.

The microscopic petrography of the Falcoña cherts depends on the locally variable grade of tectonic deformation and thermal alteration. In sections with relatively little deformation and dark colours (e.g. Falcoña), most beds are moderately re-crystallised radiolarian cherts with up to 50% radiolarian tests and few very fine-grained clastic grains. In most thin sections, a diffuse millimetre-scale parallel lamination is visible. The radiolarians may show skeletal details like spines, pores or internal structures and, thus, they can be extracted, determined, and dated (up to now only in the Falcoña type locality). Most radiolarians, however, are filled with microquartz mosaics intergrown with the skeletal microquartz crystals, so that 'microquartz balls' were formed. In localities with stronger tectonic deformation and thermal alteration, characterized by light grey cherts, strong re-crystallisation produces a microquartzitic texture: radiolarians mostly intergrow with the groundmass, in which the quartz crystals may reach 10–20 µm or more in size. Radiolarians are strongly flattened due to tectonic thinning [4] and a discontinuous tectonic pseudolamination may appear. Massive cherts with strong tectonic deformation are relatively coarse-grained microquartzites with only a few relict radiolarian 'ghosts'.

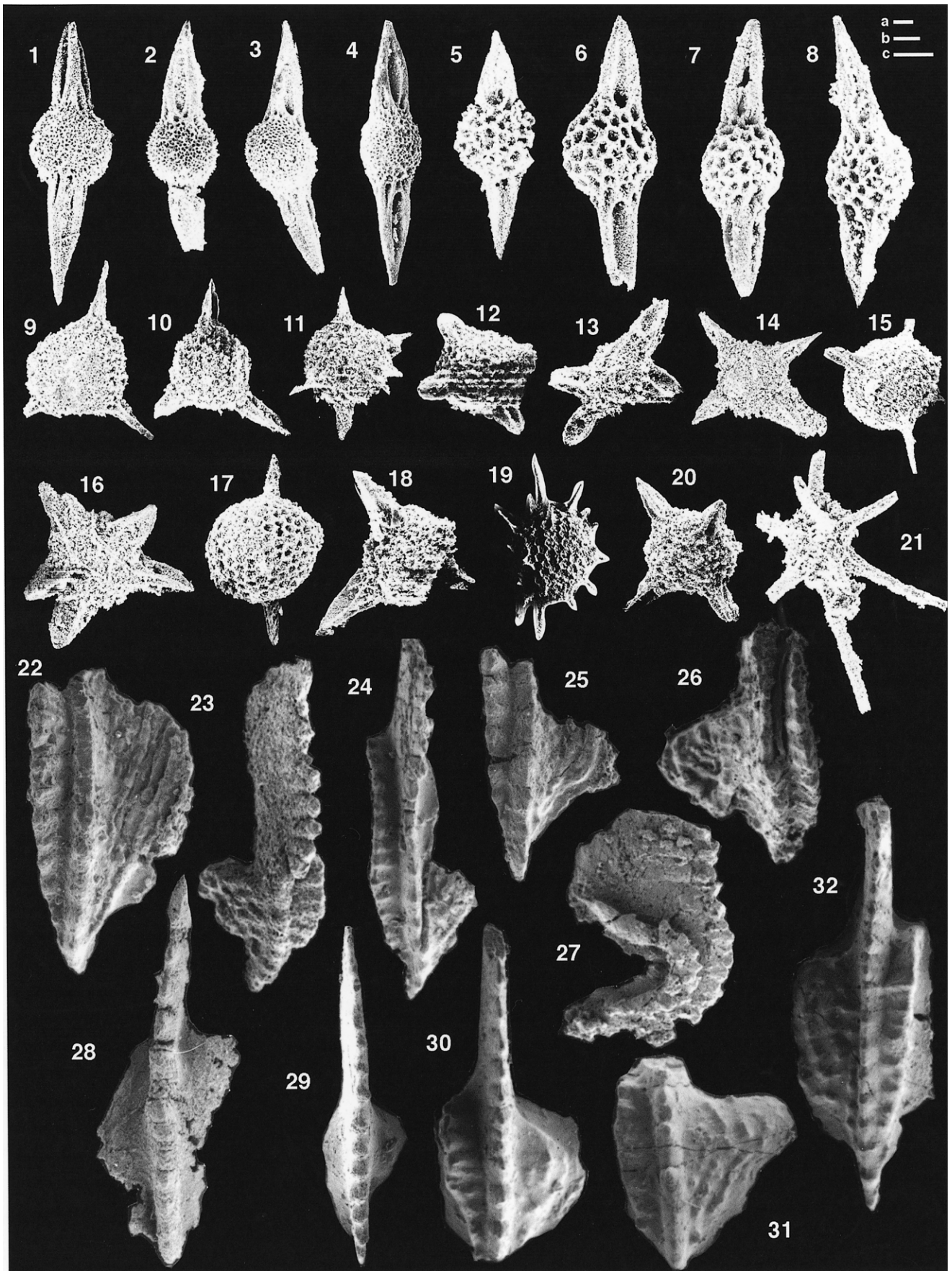
## 4. Fossils and age

In the siliceous member of the Falcoña stratotype, the following radiolarian association was obtained (figure 2): *Belowea* cf. *variabilis* (Ormiston & Lane), *Entactinia variospina* (Won), ? *Entactinia vulgaris* (Won), ? *Astroentactinia multispinosa* (Won) and Entactinaria gr. and sp. indet. This radiolarian assemblage is similar to those of the Lower Carboniferous in Germany [1, 27], Montagne Noire in France [7], and of the Devonian–Carboniferous boundary of the Catalanides in Spain [19]. The absence of Alballiellaria, Pylentonemidae and Archocyrtiidae is interpreted as a consequence of strong diagenesis and selective dissolution of delicate forms. This absence is also common in Carboniferous cherts of Greece, France (Montagne Noire, Vosges, and Armorican Massif: Caridroit, work in progress) and Germany [1, 9]. However, Lower Carboniferous radiolarian biostratigraphy is mainly based on the range of the Alballiellaria [1, 2, 7, 27], whereas the taxonomy and stratigraphy of the resistant 'spherical' radiolarians, the only ones occurring in our samples, is still unclear. Nevertheless, the most probable age for the siliceous member, as indicated by the recorded association, is Tournaisian. This is additionally supported by its stratigraphical position above Devonian beds including clasts of limestones rich in Tentaculites, and just below the limestone member, dated by conodonts in the Falcoña section as Viséan [22].

New conodont data have been obtained from the limestones in the Pechuga and Palmarillo sections, that also confirm the proposed ages of both members of the Falcoña formation. The conodont association is mainly formed by Pa elements of *Gnathodus bilineatus* (Roundy) and *Paragnathodus commutatus* (Branson & Mehl). The preservation of these elements is very poor: their morphology and texture are strongly damaged, and they are stretched, folded, flattened and broken by microfissures (figure 2, 27). Specimens showing black and white stripes and cleavage are quite common. The

**Figure 2.** Radiolarians (1 to 21) and conodonts (Pa elements: 22 to 32) from the lower and the upper members of the Falcoña formation, respectively. Scale bars for radiolarians measure 50 µm for a magnification of ×75 (a: 14, 15, 17), ×100 (b: 1–4, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 20) and ×150 (c: 5–8, 11, 21); all specimens from Falcoña section. Conodonts from El Palmarillo (22–24, 28), Pechuga (25–27) and Falcoña (29–32) sections, with magnification of ×100 (22–25, 28, 32) and ×120 (26, 27, 29–31). 1–4: *Belowea* cf. *variabilis* (Ormiston & Lane) in Won [27] 1983. 5–8: *Entactinia variospina* (Won). 9–10: ? *Entactinia variospina* (Won). 15, 18: *Entactinia vulgaris* Won. 14: ? *Astroentactinia multispinosa* (Won). 11–13, 16–17, 19–21: Entactinaria g. and sp. indet. 22–27, 31–32: *Gnathodus bilineatus* (Roundy). 28–29: *Paragnathodus commutatus* (Branson & Mehl). 30: *Gnathodus praebilineatus* Belka.

**Figure 2.** Radiolaires (1 à 21) et conodontes (éléments Pa: 22 à 32) des membres inférieur et supérieur, respectivement, de la formation Falcoña. Échelles de 50 µm pour un grossissement de ×75 (a: 14, 15, 17), ×100 (b: 1–4, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 20) et ×150 (c: 5–8, 11, 21); tous les spécimens proviennent de la coupe Falcoña. Les conodontes proviennent des coupes El Palmarillo (22–24, 28) Pechuga (25–27) et Falcoña (29–32), avec un grossissement de ×100 (22–25, 28, 32) et de ×120 (26, 27, 29–31). 1–4: *Belowea* cf. *variabilis* (Ormiston & Lane) in Won [27] 1983. 5–8: *Entactinia variospina* (Won). 9–10: ? *Entactinia variospina* (Won). 15, 18: *Entactinia vulgaris* Won. 14: ? *Astroentactinia multispinosa* (Won). 11–13, 16–17, 19–21: Entactinaria g. and sp. indet. 22–27, 31–32: *Gnathodus bilineatus* (Roundy). 28–29: *Paragnathodus commutatus* (Branson & Mehl). 30: *Gnathodus praebilineatus* Belka.



color alteration index (CAI) is highly variable from section to section even in specimens from the same sample. CAI values in the Falcoña stratotype are homogeneous and range between 3–3.5. However, CAI of the elements from Casa Otero, El Palmarillo and Pechuga usually ranges between 5.5–6.5, but some specimens display values between 3–3.5. This points to original CAI values of 3–3.5, probably the highest values resulting from high temperature hydrothermalism [20, 23] associated with the intrusion of the Lower Miocene basic dykes. The accurate identification of the better preserved elements (*figure 2*) allows us to assign these samples to the *Bilineatus–Commutatus* zone *sensu* Perret [16] of the Late Visean (Early Carboniferous). This conodont age is equivalent to previously obtained ages in Casa de Otero and Falcoña sections [22].

## 5. Palaeogeographic and palaeoceanographic framework

Siliceous sedimentary rocks are typical of many European Lower Carboniferous successions. They are prominent, e.g., in the Harz Mountains and Rhenish Massif of western Germany [8, 9], Montagne Noire of southern France [3], Cantabrian Mountains of northern Spain [24], Pyrenees [18] and South Portuguese Zone [17]. Distinctive but less extended Lower Carboniferous cherts are also present in Alpine orogens such as the Eastern Alps [25]. The chert units of Germany and South Portugal are part of the classical Culm facies, a belt of offshore sediments that lay basinward off the carbonate shelf ('Carboniferous Limestones') fringing the Laurussia (Old Red) Continent in the Lower Carboniferous. These sequences of pelagic and hemipelagic sediments, including the radiolarian cherts, grade upward to thick greywacke flysches of the developing Variscan orogeny. Similar stratigraphical evolutions are observed in the Montagne Noire, Eastern Alps and in the Malaguide Complex. In the Cantabrian Zone, however, the Lower Carboniferous cherts represent a pelagic interval within a variable sequence of mostly shelf and slope limestones [24]. All these successions, as well as the studied rocks of the Malaguide Complex, were deposited in marginal basins of Gondwana-derived microcontinental blocks. Herbig [10, 12] proposed that the Devonian to Carboniferous succession in the Malaguide Complex

was deposited in an open to marginal basin north of the Gondwana-derived 'Betic–Rif block'. In Visean and Late Carboniferous time, this basin received clastic input from Variscan subducting continental margins, and some existing carbonate platforms that were completely eroded [11, 12].

The cherts of the Falcoña formation represent a Tournaisian biogeneous interval interlayered between Devonian (Santi Petri formation) and post-Visean (Almogía formation) predominantly clastic successions. The radiolarian chert member of the Falcoña formation was deposited under bathyal pelagic conditions below the shallow Carboniferous CCD, in a temporarily starved tropical basin that was a part of the southern Palaeotethys. For at least several million years very little and very fine-grained terrigenous material was provided, so that the usually high radiolarian fertility and productivity of tropical-equatorial marine surface waters could result in the origin of radiolarian-rich sediments. Equatorial upwelling of oxygen and nutrient-rich water, dry climate and a relatively high sea level possibly favoured this situation. Under low-energy deep-sea conditions, the radiolarian tests settled to the sea floor and were partially redistributed by very low-concentrated turbidity and/or bottom currents. The sedimentation rate was presumably a few mm per 1 000 years, but it is difficult to be more precise in estimating the sedimentary rate due to tectonic flattening and a scarcity of age data. Rising of the CCD during the Visean determined the change from radiolaritic to calcareous sedimentation before the onset of flysch-like synorogenic sedimentation.

The Culm-like sedimentary basin now preserved as a relict within the Palaeozoic basement of the Malaguide Complex was one of several strait-like narrow basins that separated Laurussia, Gondwana and the microcontinents between them. Due to the northward migration of Gondwana, the Palaeotethys had become narrow in Early Carboniferous time and several subduction zones were active. The continents and continental fragments collided continuously until the Palaeotethys became progressively closed in the Late Carboniferous. In the Malaguide Complex, as in other partial basins of the Palaeotethys, the period of siliceous oceanic sedimentation ended when the Variscan flysches started from place to place and the sedimentation rates were drastically increased.

**Acknowledgements.** Financial support from Projects HA1997-0089 (Spanish-German Integrated Action), PB96-1430, PB97-1201, PB97-0826 (DGICYT, Spain) and Research Groups 4089 and 4064 (PAI, Junta de Andalucía).

## References

[1] Braun A., Evolutionary trends and biostratigraphic potential of selected radiolarian taxa from the Early Carboniferous of Germany, *Mar. Micropalaeontol.* 15 (1990) 351–364.

[2] Braun A., Schmidt-Effing R., Biozonation, diagenesis and evolution of radiolarians in the Lower Carboniferous of Germany, *Mar. Micropalaeontol.* ?? (1993) 369–383.

[3] Engel W., Feist R., Franke W., Le Carbonifère anté-Stéphanien de la Montagne noire : rapports entre mise en place des nappes et sédimentation, *Bull. BRGM* 2 (1982) 341–389.



- [4] Gálvez R., Orozco M., Strain determinations using deformed Radiolaria, Malaguide Complex, Southern Spain, *Acta Geol. Hisp.* 14 (1979) 129–134.
- [5] Gálvez R., Orozco M., Estructuras de superposición complejas en la Cordillera Bética (Región de los Montes de Málaga), *Bol. Geol. Minero* 91 (1980) 697–704.
- [6] Goldring R., The bathyal lull: Upper Devonian and Lower Carboniferous sedimentation in the Variscan geosyncline, in: Coe K. (Ed.), *Some aspects of the Variscan fold belt*, Manchester University Press, 1962, pp. 75–91.
- [7] Gourmelon F., Les Radiolaires tournaisiens des nodules phosphatés de la Montagne noire et des Pyrénées centrales, *Biostratigraphie du Paléozoïque* 6 (1987) 1–172.
- [8] Gursky H.J., Siliceous rocks of the Culm Basin, Germany, in: Strogon P., Sommerville I.D., Jones G.L. (Eds.), *Recent Advances in Carboniferous Geology*, Geol. Soc. London Spec. Publ., 1996, pp. 303–314.
- [9] Gursky H.J., Die Kieselgesteine des Unter-Karbons im Rhenoherszynikum. Sedimentologie, Petrographie, Geochemie und Paläozoographie, *Geol. Abh. Hessen* 100 (1997) 1–130.
- [10] Herbig H.G., El Carbonífero de las Cordilleras Béticas, in: Martínez Díaz C. (Ed.), *Carbonífero y Pérmico de España*, Instituto Geológico y Minero de España, 1983, pp. 343–356.
- [11] Herbig H.G., Rekonstruktion eines nicht mehr existenten Sedimentationraumes. Die Kalkgerölle in Karbon-Flysch der Malagiden (Betische Kordillere, Südspanien), *Facies* 11 (1984) 1–108.
- [12] Herbig H.G., Carboniferous Palaeogeography of the West-Mediterranean Palaeotethys, in: Yugan J., Chun L. (Eds.), *XI<sup>e</sup> Congrès Internat. Strat. Géol. Carbonifère*, vol. 4, 1989, pp. 186–196.
- [13] Herbig H.G., Mamet B., Stratigraphy of Limestone boulders, Marbella Formation (Betic Cordillera, Southern Spain), *X<sup>e</sup> Congrès Internat. Strat. Géol. Carbonifère* vol. 1 (1985) 199–212.
- [14] Kockel F., Stoppel D., Nuevos hallazgos de conodontos y algunos cortes en el Palaeozoico de Málaga, *Not. Comun. IGME* 168 (1962) 133–170.
- [15] Orozco M., Gálvez R., The development of folds in bedded chert and related rocks in the Malaguide Complex, Southern Spain, *Tectonophysics* 56 (1979) 277–295.
- [16] Perret M.F., Recherches micropaléontologiques et biostratigraphiques (conodontes et foraminifères) dans le Carbonifère pyrénéen, *Strata* 2 (1993) 1–597.
- [17] Pfefferkorn H.W., Geologie des Gebietes zwischen Serpa und Mértola (Baixo Alentejo, Portugal), *Münster Forsch. Geol. Paläont.* 9 (1968) 1–143.
- [18] Raymond D., Lethiers F., Signification géodynamique de l'événement radiolaritique dinantien dans les zones externes sud-varisques (Sud de la France et Nord de l'Espagne), *C. R. Acad. Sci. Paris série II* 310 (1990) 1263–1269.
- [19] Raymond D., Caridroit M., Le Dévonien–Carbonifère inférieur du Priorat (Catalogne, Espagne) : nouvelles données micropaléontologiques et interprétation paléogéographique, *Acta Geol. Hisp.* 28 (1994) 27–31.
- [20] Rejebian V.A., Harris A.G., Huebner J.S., Conodont color and textural alteration: An index to regional metamorphism, contact metamorphism, and hydrothermalism, *G.S.A. Bull.* 99 (1987) 471–479.
- [21] Rodríguez Cañero R., Contribución al estudio de los conodontos del Complejo Malaguide (Cordillera Bética), thesis, Universidad de Málaga, 1993.
- [22] Rodríguez Cañero R., Guerra Merchán A., Nuevos datos sobre la fauna de conodontos y la edad de la Formación Falcoña (Complejo Malaguide, Cordillera Bética, España), *Rev. Esp. Palaeont.* 11 (1996) 235–246.
- [23] Sarmiento G.N., García-López S., El método del Índice de Alteración del Color (CAI) de los conodontos: limitaciones y posibilidades. Ejemplos de su aplicación en el Hercínico Ibérico, *Rev. Soc. Geol. España* 9 (1996) 113–123.
- [24] Seibert P., Fazies und Paläogeographie des Unter-Karbon (Alba Formation) im Kantabrischen Gebirge (Nordspanien), thesis, Universität Tübingen, 1988.
- [25] Spaletta C., Concordanza stratigrafica tra carbonati, radiolariti e flysch ercinico nelle Alpi Carniche (Devoniano–Silesiano), *Mem. Soc. Geol. Italia* 24 (1982) 11–21.
- [26] Torres-Roldán R.L., Polli G., Peccerillo A., An Early Miocene arc-tholeiitic magmatic dyke event from the Alboran sea. Evidence for precollisional subduction and back arc-crustal extension in the westernmost Mediterranean, *Geol. Rundschau* 75 (1986) 219–234.
- [27] Won M.Z., Radiolarien aus dem Unterkarbon des Rheinischen Schiefergebirges (Deutschland), *Palaeontographica A* 182 (1983) 116–175.