

**Serie / NOVA TERRA**

**The Eclogitic Gneisses  
of the Cabo Ortegal Complex:  
Provenance and tectonothermal evolution  
(zircon U-Pb/Lu-Hf methods)**

Richard Albert Roper

**A Coruña 2017**

ISSN: 1131-3503  
ISBN: 978-84-9749-668-1  
Depósito Legal: C 1177-2017  
Imprime: Tórculo Comunicación Gráfica, S.A.  
A Coruña, 2017

Ilustración de cubierta: Richard Albert Roper  
Maquetación: Richard Albert Roper  
Portada: Gneises bandeados en la península de Masanteo (Unidad de A Capelada)

#### FICHA DE CATALOGACIÓN

ALBERT ROPER, Richard

The eclogitic gneisses of the Cabo Ortegal Complex: provenance and tectonothermal evolution (Zircon U-Pb/Lu-Hf methods) / Richard Albert Roper, [Ed. científico: Juan Ramón Vidal Romaní]. --A Coruña; Universidade da Coruña, Instituto Universitario de Xeoloxía "Isidro Parga Pondal", 2017

335 pp; 24 cm; figuras; fotos color; anexos; tablas; mapas; artículos científicos. -- (Serie Nova Terra; 48)

Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid. -- Bibliografía. -- incluye índice. En inglés, resumen en inglés y español

ISBN: 978-84-9749-668-1 D. L: C 1177-2017

ISSN: 1131-3503

1. Gneis eclogítico, Cabo Ortegal, Galicia, España 2. Procedencia terrenos alóctonos, Cabo Ortegal, Galicia, España 3. Nacimiento de Pangea 4. Europa I. Vidal Romaní, Juan Ramón Vidal, ed. II. Universidade da Coruña, Instituto Universitario de Xeoloxía "Isidro Parga Pondal", ed. III- Tít. IV. (Serie Nova Terra; 48)

Esta publicación se ha realizado con papel procedente de una fuente gestionada responsablemente



*To everyone I love*

*A aquellos que amo*



# Agradecimientos

La tesis doctoral que aquí presento ha sido fruto de un intenso y largo trabajo, que ha llegado a buen puerto gracias a varias personas que me han apoyado en estos años. En los siguientes párrafos quiero agradecer de manera muy especial a aquellas personas sin las cuales esta tesis no habría sido la misma, e incluso, no habría sido.

En primer lugar quiero agradecer a mi principal supervisor, Ricardo Arenas. Desde el primer momento apostaste por mí, incluso antes de empezar el máster. No sólo quiero agradecerte que hayas sido un buen director (que no es poco, viendo el panorama), sino que has ido más allá. Además de tomarte muy en serio tu labor de supervisor y de maestro, me has tratado como a un igual, sin palabras fuera de lugar ni de tono, con paciencia, dando ánimos cuando los necesité y abriéndome todas las puertas que pudiste. Mi vida pudo seguir otros muchos derroteros, pero al final estoy escribiendo éstas palabras porque pude seguir el camino que yo quería seguir, el de la ciencia, y te lo agradezco sobre todo a ti Ricardo. Gracias.

I also want to thank another one of my supervisors, Axel Gerdes. From the first moment, you accepted me, you gave me access to the Institut and to the lab and you taught me many things. Thanks to you this PhD is what it is, and has the strength it has. But not only that, you had time for me. And this is not a minor thing, I'm totally aware of it. Thanks for everything you've done and thanks for doing more than you "should".

Y además quiero agradecer a mi supervisora Sonia Sánchez Martínez. Gracias por estar siempre disponible para cualquier pregunta que tuviese, por tu disposición a ayudarme y guiarme y por aquellas campañas de campo. Gracias.

Agradezco a todos los miembros del grupo de investigación por el día a día, el trato amigable, y su disposición, al Departamento de Petrología y Geoquímica por acogerme y facilitarme los medios materiales necesarios, con una mención especial a Isabel, Beatriz y Miguel Ángel, a la Facultad de Ciencias Geológicas por formarme (y a Lidia y Wyo por hacer que funcione), y a UCM por concederme la beca predoctoral.

Quiero agradecer al personal del taller de Petrología y Geoquímica, a Marián, Carmen y Pedro, por el excelente trato recibido, por enseñarme todo lo relacionado con la preparación de muestras y de láminas delgadas y por preparar diligentemente aquellas muestras urgentes que en su momento necesité. También agradecer al CAI de Geocronología y Geoquímica Isotópica, a Carmen Galindo, a Chema y a José Antonio. Durante la larga temporada que pasé en el laboratorio aprendí multitud de cosas, preparación de muestras, titulaciones, técnicas cromatográficas, análisis con los espectrómetros y un largo etcétera, en el que por supuesto incluyo las técnicas de exhaustiva limpieza. Gracias.

I'm also thankful to all the people I met in Frankfurt, especially to Gerhard Brey for allowing me to work in the Institut, and to Heidi, Wolf and Armin and also to Linda and Zehra for all those very nice moments we spent together. Thanks.

Agradezco a los revisores anónimos de la tesis doctoral y a los revisores internacionales (Gerhard Brey, Ulf Linnemann y Francisco Pereira) por sus excelentes informes. También quiero agradecer a los revisores de los artículos que se presentan en ésta tesis doctoral, que aumentaron considerablemente la calidad de éstos con sus comentarios y apreciaciones.

Agradecer a mi toda mi familia pues sin ellos dudo que hubiese llegado hasta éste punto. Gracias papá, por todo... por contribuir a ser quien soy y sobre todo por aguantar. Thanks mum, you've done more than you possibly could, I can't find the right words to say how much I love you. And to you Tom Tom the drum, where ever you are, we still got a guinness pending... A mis hermanos, Jordan y

Bárbara, por estar siempre al pie del cañón, a Moisés, a Marta, a mis tíos y primos... y por supuesto a mi tío-abuelo Luis. Sin tu ayuda y apoyo incondicionales tanto a mí como a mi familia esta tesis habría sido un sueño inalcanzable.

A mi entorno social, a los Colegas, sobre todo a los geomongers, los miners, al Garrote, y a los geolokos. Y por supuesto a vosotras dos, por vuestra gran amistad, por todo lo vivido y por vivir, por quien sois... y a ti gruñón... ;)

Y por último a ti Sandra. Por corresponderme, por entretener tu vida con la mía durante este tiempo, por aguantar al grunchón que se mostró al final de la tesis, por ser quien eres... gracias apa... muak!

# Index

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Abstract</b> .....                                                                                                                                        | vii |
| <b>Resumen</b> .....                                                                                                                                         | ix  |
| <b>Chapter 1. Introduction</b> .....                                                                                                                         | 1   |
| 1.1. Introduction to the PhD Thesis.....                                                                                                                     | 1   |
| 1.2. Article summary.....                                                                                                                                    | 3   |
| <b>Chapter 2. Objectives and methodology</b> .....                                                                                                           | 5   |
| <b>Chapter 3. Allochthonous terranes involved in the Variscan suture of Galicia (NW Iberia): A review of their origin and tectonothermal evolution</b> ..... | 9   |
| 3.1. Introduction.....                                                                                                                                       | 9   |
| 3.2. Partial conclusions.....                                                                                                                                | 9   |
| 3.3. Article.....                                                                                                                                            | 11  |
| <b>Chapter 4. The eclogite facies gneisses of the Cabo Ortegal Complex (NW Iberian Massif): Tectonothermal evolution and exhumation model</b> ..             | 67  |
| 4.1. Introduction.....                                                                                                                                       | 67  |
| 4.2. Partial conclusions.....                                                                                                                                | 67  |
| 4.3. Article.....                                                                                                                                            | 69  |
| <b>Chapter 5. Provenance of the Variscan Upper Allochthon (Cabo Ortegal Complex, NW Iberian Massif)</b> .....                                                | 87  |
| 5.1. Introduction.....                                                                                                                                       | 87  |
| 5.2. Partial conclusions.....                                                                                                                                | 88  |
| 5.3. Article.....                                                                                                                                            | 89  |
| <b>Chapter 6. Provenance of the HP-HT subducted margin in the Variscan belt (Cabo Ortegal Complex, NW Iberian Massif)</b> .....                              | 105 |
| 6.1. Introduction.....                                                                                                                                       | 105 |
| 6.2. Partial conclusions.....                                                                                                                                | 105 |
| 6.3. Article.....                                                                                                                                            | 109 |
| <b>Chapter 7. Migmatization, eclogitization and magmatism</b> .....                                                                                          | 131 |
| 7.1. Introduction.....                                                                                                                                       | 131 |
| 7.2. Leucosomes.....                                                                                                                                         | 132 |
| 7.2.1. Sample GCH-25 ( <i>Sismundi leucosome</i> ).....                                                                                                      | 133 |
| 7.2.1.1. Results.....                                                                                                                                        | 133 |
| 7.2.1.2. Discussion.....                                                                                                                                     | 134 |
| 7.2.2. Sample GCH-26 ( <i>Figueiroa leucosome</i> ).....                                                                                                     | 138 |
| 7.2.2.1. Results.....                                                                                                                                        | 138 |
| 7.2.2.2. Discussion.....                                                                                                                                     | 139 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.3. Sample GCH-32 ( <i>Area da Vaca leucosome, 205 m</i> ).....              | 143 |
| 7.2.3.1. Results.....                                                           | 143 |
| 7.2.3.2. Discussion.....                                                        | 144 |
| 7.3. <i>Eclogites</i> .....                                                     | 148 |
| 7.3.1. Sample GCH-19 ( <i>Ortegal lighthouse eclogite</i> ).....                | 149 |
| 7.3.1.1. Results.....                                                           | 149 |
| 7.3.1.2. Discussion.....                                                        | 150 |
| 7.3.2. Sample GCH-20 ( <i>Cariño's beach ultramafic zone eclogite</i> ).....    | 153 |
| 7.3.2.1. Results.....                                                           | 154 |
| 7.3.2.2. Discussion.....                                                        | 155 |
| 7.3.3. Sample GCH-22 ( <i>Concepenido eclogite</i> ).....                       | 158 |
| 7.3.3.1. Results.....                                                           | 158 |
| 7.3.3.2. Discussion.....                                                        | 159 |
| 7.3.4. Sample GCH-23 ( <i>Da Moura eclogite</i> ).....                          | 163 |
| 7.3.4.1. Results.....                                                           | 163 |
| 7.3.4.2. Discussion.....                                                        | 164 |
| 7.4. <i>Orthogneisses</i> .....                                                 | 167 |
| 7.4.1. Sample GCH-01 ( <i>Cariño's beach ultramafic zone orthogneiss</i> )..... | 168 |
| 7.4.1.1. Results.....                                                           | 168 |
| 7.4.1.2. Discussion.....                                                        | 169 |
| 7.4.2. Sample GCH-03 ( <i>Area da Vaca orthogneiss, 100 m</i> ).....            | 173 |
| 7.4.2.1. Results.....                                                           | 173 |
| 7.4.2.2. Discussion.....                                                        | 174 |
| 7.4.3. Sample GCH-13 ( <i>Figueiroa orthogneiss</i> ).....                      | 178 |
| 7.4.3.1. Results.....                                                           | 178 |
| 7.4.3.2. Discussion.....                                                        | 179 |
| 7.4.4. Sample GCH-14 ( <i>Da Moura orthogneiss</i> ).....                       | 182 |
| 7.4.4.1. Results.....                                                           | 182 |
| 7.4.4.2. Discussion.....                                                        | 183 |
| 7.4.5. Sample GCH-18 ( <i>Area da Vaca orthogneiss, 275 m</i> ).....            | 186 |
| 7.4.5.1. Results.....                                                           | 186 |
| 7.4.5.2. Discussion.....                                                        | 187 |
| 7.4.6. Sample GCH-31 ( <i>Serrón orthogneiss</i> ).....                         | 190 |
| 7.4.6.1. Results.....                                                           | 190 |
| 7.4.6.2. Discussion.....                                                        | 191 |
| 7.5. <i>Discussion</i> .....                                                    | 195 |
| 7.5.1. <i>Leucosomes</i> .....                                                  | 195 |
| 7.5.2. <i>Eclogites</i> .....                                                   | 196 |
| 7.5.3. <i>Orthogneisses</i> .....                                               | 197 |
| 7.6. <i>General discussion</i> .....                                            | 200 |
| 7.7. <i>References</i> .....                                                    | 201 |



|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Chapter 8. Two-stage collision: Exploring the birth of Pangea in the Variscan terranes.....</b> | <b>203</b> |
| 8.1. Introduction.....                                                                             | 203        |
| 8.2. Partial conclusions.....                                                                      | 203        |
| 8.3. Article.....                                                                                  | 205        |
| <b>Chapter 9. Final discussion and conclusions.....</b>                                            | <b>213</b> |
| <b>Supporting information.....</b>                                                                 | <b>217</b> |
| Appx. 1. Map with sample locations.....                                                            | 219        |
| Appx. 2. Data Tables for chapter 5 (Tables 1—12).....                                              | 223        |
| (digital version only)                                                                             |            |
| Appx. 3. Data Tables for chapter 6 (Tables S1—S12).....                                            | 259        |
| (digital version only)                                                                             |            |
| Appx. 4. Data Tables for chapter 7.....                                                            | 289        |
| (Tables Ig1-U—Ig13-U & Tables Ig1-Hf—Ig13-Hf)                                                      |            |
| (digital version only)                                                                             |            |



# Abstract

The Variscan belt was formed when several continents interacted to finally form the supercontinent of Pangea. In this general context of continent interaction and orogen development this PhD was projected and is presented in this document. The main objective of this thesis is to explore the origin, the sources and the development of a high-grade metamorphic terrane involved in this orogenesis. This PhD focuses on the Eclogitic Gneisses (Banded Gneisses), which are included in the high-pressure and high-temperature (HP-HT) member of the Upper Allochthon of the Cabo Ortegal Complex (NW Iberia), and also deals with the Eclogite band and the Cariño Gneisses, so that the general tectonothermal evolution is better accounted for.

To address the objectives of this thesis, several methods have been applied. The first group of methods had the aim of recognising and describing the subject of study, from a macroscopic point of view (cartography and detailed representation of geological sections) to a microscopic level (thin section observation and description). When this recognition was carried out and the scientific literature was handled, detailed isotopic experiments were performed. U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd radiogenic methods were applied to make provenance approaches of the detrital materials, to constrain the age of rock formation, the primary sources of magmatic generation and the age and features of the high-grade metamorphic development of the igneous rocks of the studied units.

This PhD document has been organised in an article format, where the majority of the results are presented as articles, from which the PhD candidate is the corresponding author or co-author. This thesis starts with a general introduction and with an exposure of the main objectives posed and methods applied. Afterwards, a general review of the origin and evolution of the NW Iberian terranes, and a detailed study from a macroscopic to a microscopic point of view of the main formation studied, together with a discussion of its tectonothermal evolution and an exhumation modelling is presented. Then, a provenance approach together with a paleogeographic reconstruction proposal, studying the detrital materials of the intermediate-pressure top member of the Upper Allochthon is shown. These provenance studies were also applied to the HP-HT Banded Gneiss formation, mainly to find out which continental fragment subducted in the Devonian. After this work, isotope geochemistry techniques were applied to several igneous rocks that registered the evolution of a long-lived magmatic arc and the deformations attained by the HP-HT subduction-related metamorphic event. Afterwards, a discussion integrating this subduction event in the general framework of the assembly of Pangea is presented. Finally, this PhD finishes exposing an integrated discussion and the general conclusions achieved.

The main conclusions derived from this PhD thesis are that the Upper Allochthon is a single terrane and not a composite one, from which its metasedimentary rocks are derived from the Gondwana mainland, specifically from the West African Craton (WAC). The detritus that constitute the metasedimentary rocks were deposited in a back-arc type basin between c. 521–506 Ma. These sediments register the crustal growth events of the WAC and the formation of a volcanic arc system that is considered to be the Cadomian arc. The initial activity of this arc is constrained between c. 780 Ma and c. 590 Ma, defining the “proto-arc stage”, where mainly crustal recycling of the margin of Gondwana where it was built, took place. The “arc-stage” was developed between c. 590 and 490 Ma where broad mixing processes took place between the intruding depleted mantle (DM) derived magmas and the old pre-existing crust. The igneous rocks registered part of the magmatic arc activity (D0 event). The first record of acidic magma intrusion has an age of c. 512 Ma and has diverse source signatures. It seems that around c. 498 Ma an arc-related high-temperature input gave as a result fractional crystallisation of acidic rocks from DM-derived partial melts. The basic magmas started to intrude at c. 505 Ma and had different sources, from magmas almost directly derived from the partial melting of the depleted mantle, to isotopically enriched magmas, which could derive from the partial fusion of an

enriched mantle component (probably the subcontinental mantle of Gondwana) and as an important contamination of DM-derived melts with continental crust material, respectively. The metasedimentary rocks were partially melted at around 485–495 Ma. After the magmatic activity finished, the Upper Allochthon did not drift away opening the Rheic Ocean, as it has been proposed by other authors for the Avalonian terranes, but formed part of the extended passive margin of Gondwana until the Devonian. The high-grade metamorphism attained by the Upper Allochthon was driven by the subduction of the margin of Gondwana under the colliding retro-continent. Taking into account the paleogeographic reconstructions proposed by other authors for the Devonian, this retro-continent should be Laurussia, but it is likely to be another continental fragment of Gondwana. In the context of this high-grade metamorphic event (D1 event) zircon recrystallised at c. 395 Ma in the acidic rocks. The basic rocks were transformed into eclogites, which was recorded by a zircon recrystallisation climax at c. 393 Ma, most probably near the metamorphic P–T path temperature peak. The high-grade metamorphic event re-melted the leucosomes at high-T conditions between 379 and 403 Ma, with a climax at c. 388 Ma. During this subduction event the Upper Allochthon was exhumed as an ultra-HP buoyant plume (D2 event). The progression of the deformational history of the upper units entails the development of large recumbent folds and an important basal thrust (D3 structures). The mentioned subduction event was the first one attained by the margin of Gondwana in the complex history of the early stages of supercontinent assembly.

# Resumen

El cinturón Varisco se formó cuando varios continentes interactuaron para acabar formando el supercontinente de Pangea. La tesis que aquí se presenta se enmarca en este contexto general de interacción continental y desarrollo orogénico. El principal objetivo es explorar la formación, las fuentes y el desarrollo de un terreno metamórfico de alto grado involucrado en la orogénesis Varisca. En esta tesis se hace especial hincapié en los Gneises Eclogíticos (Gneises Bandeados), los cuales están incluidos en el miembro de alta presión y alta temperatura (*HP-HT*) del Alóctono Superior del Complejo de Cabo Ortegal (NO de Iberia). También se aborda el estudio de otros miembros del Alóctono Superior, como la banda principal de eclogitas y los Gneises de Cariño, con el fin de tener más herramientas para abordar la evolución tectonotermal general.

Para cumplir con los objetivos de esta tesis se han aplicado varios métodos. El primer grupo de métodos tenían por objetivo reconocer y describir el objeto de estudio, desde un punto de vista macroscópico (cartografía y representación detallada de secciones geológicas) hasta un punto de vista microscópico (observación y descripción de láminas delgadas). Una vez terminado el reconocimiento de las diferentes litologías y de la revisión bibliográfica pertinente, se llevaron a cabo determinaciones isotópicas detalladas. Se aplicaron métodos isotópicos U-Pb, Lu-Hf y Sm-Nd en las formaciones estudiadas para conocer las áreas fuente de los materiales detríticos, las edades de cristalización, las fuentes ígneas primigenias y la edad y las condiciones del metamorfismo de alto grado desarrollado en las rocas ígneas estudiadas.

Esta tesis doctoral ha sido organizada en formato de artículos, en los cuales se han presentado la mayoría de los resultados obtenidos y en los que el doctorando es autor o coautor. Este documento comienza con una introducción general y con la exposición de los principales objetivos y métodos aplicados. A continuación se presenta una revisión general sobre el origen y evolución de los terrenos del NO de Iberia y un estudio detallado desde un punto de vista macro- y microscópico de los Gneises Eclogíticos, junto con una discusión de su evolución tectonotermal y su mecanismo de exhumación. Después se muestra un estudio de procedencia y una propuesta de reconstrucción paleogeográfica de los materiales detríticos del miembro culminante de presión intermedia (*IP*) del Alóctono Superior. Estos estudios también se han realizado en la formación de los Gneises Eclogíticos, para conocer, principalmente, la identidad del fragmento continental que subdujo en el Devónico. Posteriormente se aplicaron técnicas de geoquímica isotópica en varias rocas ígneas que registraron la evolución de un arco magmático longevo y de las deformaciones inducidas por el evento metamórfico subductivo de *HP-HT*. Seguidamente se expone una discusión que integra este evento subductivo en el contexto general del ensamblaje de Pangea. Finalmente, esta tesis doctoral concluye con una discusión integradora y con una síntesis de las conclusiones generales obtenidas.

Las principales conclusiones derivadas de esta tesis doctoral son que el Alóctono Superior no es un terreno compuesto sino uno simple, cuyas rocas detríticas provienen del continente Gondwana, concretamente del Cratón de África Occidental (*WAC*). Los detritos de las rocas metasedimentarias se depositaron en una cuenca de retro arco en torno a *c.* 521–506 Ma. Estos sedimentos registran los eventos de crecimiento cortical del *WAC*, y la formación de un sistema de arcos volcánicos, el cual se considera ser el arco Cadomiense. La actividad inicial de este arco, llamada “fase de proto-arco”, tuvo lugar entre *c.* 780 y *c.* 590 Ma, donde principalmente tuvo lugar un reciclado cortical del margen continental de Gondwana. La “fase de arco” se extendió entre *c.* 590 y *c.* 490 Ma, y en ella se produjeron intensos procesos de mezcla entre magmas derivados del manto empobrecido (*DM*) y la corteza continental antigua. Las rocas ígneas registraron parte de la actividad del arco (evento *D0*). El primer registro de la intrusión de rocas ácidas, que muestra una diversidad de fuentes, es de *c.* 512 Ma. Los datos apuntan a que en torno a *c.* 498 Ma un alto aporte térmico relacionado con la actividad del arco dio lugar a la cristalización fraccionada de rocas ácidas a partir de fundidos parciales

derivados del manto empobrecido. Los magmas básicos, que empezaron a intruir hacia c. 505 Ma, tienen diferentes fuentes, desde magmas derivados principalmente de la fusión parcial del manto empobrecido, hasta magmas isotópicamente enriquecidos, probablemente derivados de la fusión parcial de un componente mantélico enriquecido (seguramente el manto subcontinental de Gondwana) y de la contaminación de fundidos derivados del *DM* con materiales de la corteza continental. Las rocas metasedimentarias fundieron parcialmente en torno a c. 485–495 Ma. A diferencia de lo esperado, cuando la actividad magmática del arco cesó, la migración del Alóctono Superior no dejó tras de sí un extenso océano, como parece que sí lo hicieron (según otros autores) los terrenos avalonianos, que en su deriva continental dejaron paso a la apertura del Océano Rhéico. El Alóctono Superior formó parte del margen pasivo y extendido de Gondwana hasta el Devónico. El metamorfismo de alto grado que registra este terreno se produjo por la subducción del margen de Gondwana bajo un retro continente. Teniendo en cuenta las reconstrucciones paleogeográficas de otros autores para el Devónico, este retro continente debió de ser Laurusia, pero es probable que sea otro fragmento continental de Gondwana. En el contexto de este evento metamórfico de alto grado (evento D1) el circón de las rocas ácidas recrystalizó a c. 395 Ma. Las rocas básicas fueron transformadas en eclogitas mostrando un clímax de recrystalización de circón en torno a c. 393 Ma, probablemente cerca del pico térmico de la trayectoria metamórfica P–T. El metamorfismo de alto grado volvió a fundir los leucosomas en condiciones de alta temperatura entre 379 y 403 Ma, con un clímax a c. 388 Ma. Durante esta subducción el Alóctono Superior fue exhumado como una pluma de ultra alta presión (evento D2). La progresión de la historia deformativa de las unidades superiores condujo al desarrollo de enormes pliegues recumbentes y de un gran cabalgamiento basal (estructuras D3). Este evento de subducción fue el primero que sufrió el margen de Gondwana en la compleja historia de los estadios iniciales del ensamblado supercontinental.