



## Reinstauración del Grupo Yamayo (Bellido y Guevara, 1963) y su significado en la evolución de la margen peruana del Carbonífero al Triásico

Thierry Sempere<sup>1</sup>, Flora Boekhout<sup>2</sup>, Mélanie Noury<sup>1</sup>, Esteban Taipe<sup>3</sup>,  
Fredy García<sup>3</sup>, Javier Jacay<sup>4</sup>, Richard A. Spikings<sup>2</sup>, y Urs Schaltegger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISTERre (IRD – Université de Grenoble 1 – CNRS), Grenoble, Francia, y Lima, Perú ([Thierry.Sempere@ird.fr](mailto:Thierry.Sempere@ird.fr))

<sup>2</sup> Département de minéralogie, Section des Sciences de la Terre, Université de Genève, Ginebra, Suiza

<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú

### ABSTRACT

The Yamayo Group of southern Peru consists of a mostly sedimentary unit that post-dates the basement and is sharply to rapidly overlain by the dominantly volcanic Chocolate Formation. Its thickness varies from 0 (near Cerro Verde) to >2.5 km (in several coastal areas). The unit includes continental and marine deposits, the latter apparently increasing in proportion toward the SW, where they dominantly consist of dark siltstones and shales (and locally include some bedded or massive chert). Marine deposits grade upwards and northeastwards into shallow-marine and fine to locally very coarse alluvial clastics, which apparently prograded toward the SW.

New U-Pb ages on detrital zircons (Boekhout et al., 2013) and a number of paleontological data converge to indicate that the Yamayo Group was deposited from before ~330 (mid-Carboniferous) to ~220 Ma (Late Triassic). Although it spans a ≥110 Myr-long interval, this unit apparently displays no major internal

unconformity or hiatus, at least in several sections.

Regional considerations suggest that the Yamayo Group was deposited in the forearc basin that extended southwest of the coeval Andean arc, and during an interval of intense extension of the margin as indicated by a number of compelling field observations. Consistent with the structural and stratigraphic data, preliminary thermochronologic ages point to rapid cooling of the related basement in the Late Triassic–Early Jurassic.

This marked extensional tectonic evolution is reflected by the fact that the contact of the Yamayo Group with the basement is often a normal fault or even a low-angle detachment. Extensional structures have undergone little to no tectonic inversion during the subsequent Andean evolution.

Because dark shales, coarse sandstones, and extensional structures are inferred to extend southwestwards, the offshore area presents interest for hydrocarbon exploration.

### 1. Introducción: Necesidad de reinstaurar el Grupo Yamayo

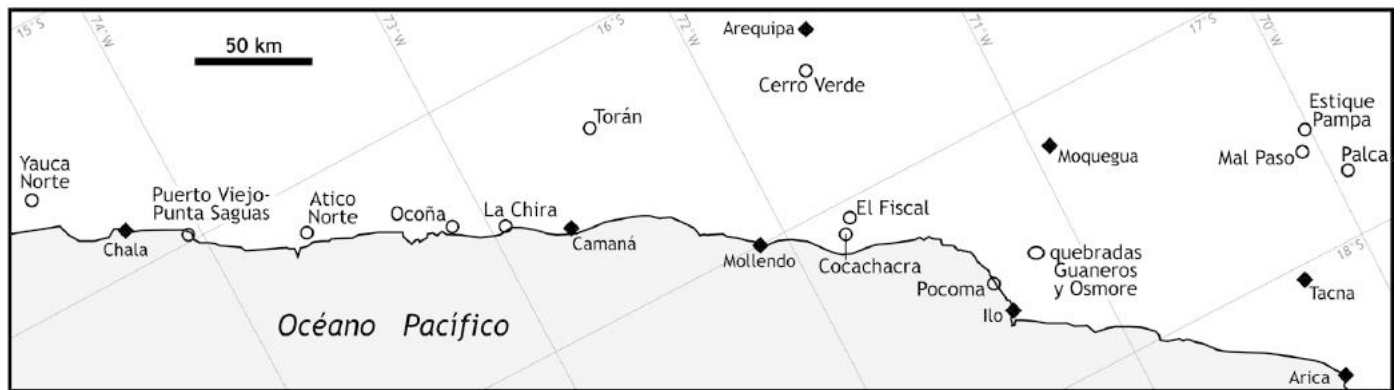
El Grupo Yamayo fue correctamente definido por Bellido y Guevara (1963) para describir en la zona de El Fiscal (Fig. 1) una sucesión principalmente sedimentaria que sobreyace al basamento y subyace a la Formación Chocolate (Jenks, 1948), la cual consiste de acumulaciones mayormente volcánicas a volcanoclásticas. Ambos

contactos son estratigráficos en esta zona, y el espesor de la unidad está estimado entre ~0.5 y ~1.5 km, dependiendo de los autores. Bellido y Guevara (1963) asignaron el Grupo Yamayo al Triásico superior–Liásico inferior por infrayacer a la Fm Chocolate (que a su vez es cubierta por calizas del Liásico superior en la zona de

Arequipa), y por el hallazgo, en esta misma unidad de la quebrada Osmore, ~77 km al SE de El Fiscal, de plantas tentativamente determinadas como afines a *Pterophyllum* sp. y por lo tanto del Triásico superior a Jurásico (Narváez, 1964).

Cerca de la localidad de Cocachacra, 8 km al SO de El Fiscal, Bellido y Guevara (1963) definieron el "conglomerado Pocoma" (espesor:  $\geq 40$  m), compuesto de clastos del basamento, y las sobreyacentes "lutitas Cocachacra" (espesor aflorante: ~30 m) que muestran facies bastante silíceas. El mapeo geológico indica que estas dos unidades conforman en el área los miembros más basales del Grupo Yamayo, del cual se encuentran separadas por una espesa intrusión tabular datada en ~165 Ma (Boekhout et al., 2012). Bellido y Guevara (1963) reportaron inicialmente en las "lutitas Cocachacra" fósiles marinos mal preservados (*Punctospirifer* sp., *Fenestella retiformis*), que les sugirieron el Paleozoico superior, y en particular el Pérmico inferior por tratarse

de formas comunes en el Grupo Copacabana del Perú central. Sin embargo, braquiópodos de la misma localidad se asignaron poco después a formas del Devónico inferior (G. A. Cooper, in Paredes, 1964), lo que más tarde fue confirmado y detallado por Boucot et al. (1980). Estos autores atribuyeron a esta fauna una edad emsiana (~407–398 Ma; Gradstein et al., 2004), pero subrayaron que difiere marcadamente de la fauna coetánea clásica del Grupo Cabanillas, siendo la primera de aguas cálidas y la segunda de aguas frías. Pese a esta evidente discrepancia, la edad emsiana se aceptó de inmediato, con la consecuencia que el Grupo Yamayo entero pasó a ser correlacionado con el Grupo Cabanillas del Altiplano, y referido como tal. En el sur del Perú, otras unidades de litologías similares, como las que afloran en Estique Pampa y Torán (Fig. 1), fueron también asignadas al Grupo Cabanillas, es decir al Devónico. Más tarde se halló también un trilobite sugestivo del Devónico (Chacaltana et al., 2002).



**Figura 1.** Ubicación de las principales localidades referentes al Grupo Yamayo en el sur del Perú (círculos abiertos). La localidad de La Mina en la península de Paracas queda 310 km al noroeste de Chala, afuera de este mapa.

La datación de zircones detríticos por el método U-Pb proporciona sólo edades máximas para el estrato muestreado, pero esta información puede ser valiosa. En los últimos años se dataron zircones detríticos de 3 muestras colectadas al azar en el Grupo Yamayo en la misma área de Cocachacra-El Fiscal. En la muestra estudiada por Reimann et al. (2010), los zircones más jóvenes tienen edades de ~301 y ~297 Ma (es decir alrededor del límite Carbonífero-Pérmico), y otros son carboníferos (~350 y ~323 Ma). Los zircones más jóvenes datados por Boekhout et al. (en prensa) en otras 2 muestras también son carboníferos (~337 y ~320 Ma, resp.; el zircón de ~320 Ma proviene de un estrato ubicado sólo ~270 m encima de la base de la unidad). Estos datos demuestran que el Grupo Yamayo del área de Cocachacra-El Fiscal incluye estratos que fueron depositados durante o después del Pensilvaniano (y quizás hasta Pérmico inferior). Dado que estas muestras se tomaron al azar en el Grupo Yamayo, es probable que la fauna de braquiópodos de su parte basal no sea del Devónico inferior sino más bien del Carbonífero. Según P. Racheboeuf (paleontólogo de braquiópodos; com. pers. a T.S., 2009), el fósil ilustrado como *Acrospirifer* cf. *A. atlanticus* por Boucot et al. (1980) es similar a *Alispirifer* cf. *transversus*, descrito por Angiolini et al. (2003) en el Pensilvaniano inferior (~318-307 Ma) de Colombia. Estos

nuevos datos son mutuamente consistentes y en conjunto hacen que la unidad es probablemente en gran parte carbonífera-pérmica, lo que explica la gran diferencia entre su fauna de aguas cálidas, y la fauna de aguas frías típica del Grupo Cabanillas devónico. Por estas razones es evidente que ya no se puede considerar esta unidad como "Grupo Cabanillas" y por lo tanto es necesario volver a la denominación dada inicialmente por Bellido y Guevara (1963) en forma muy correcta.

## 2. El Grupo Yamayo en el sur del Perú

El Grupo Yamayo se reconoce fácilmente en otras secciones del sur del Perú (Fig. 1), donde forma una potente sucesión esencialmente sedimentaria que es posterior al basamento y/o subyace a la Fm Chocolate (siendo sin embargo ausente de la sección de Cerro Verde, donde la Fm Chocolate sobryace directamente al basamento). El Grupo Yamayo comprende generalmente una base conglomerádica, una parte inferior con lutitas y limolitas oscuras y areniscas finas, y una parte superior dominada por depósitos de grano más grueso, desde areniscas medianas hasta conglomerados localmente muy gruesos (Fig. 2). Sin embargo, la distribución y espesor de estas megafacies varían mucho entre las secciones, las

cuales además son a menudo incompletas. Donde está presente, se estima que su espesor completo varía entre ~0.5 y >2.5 km. La cuenca parece haber profundizado hacia el SO, dado que los depósitos marinos parecen más comunes y espesos en esta dirección, al inverso de los continentales. Depósitos de chert estratificado o masivo se observan también en el SO.

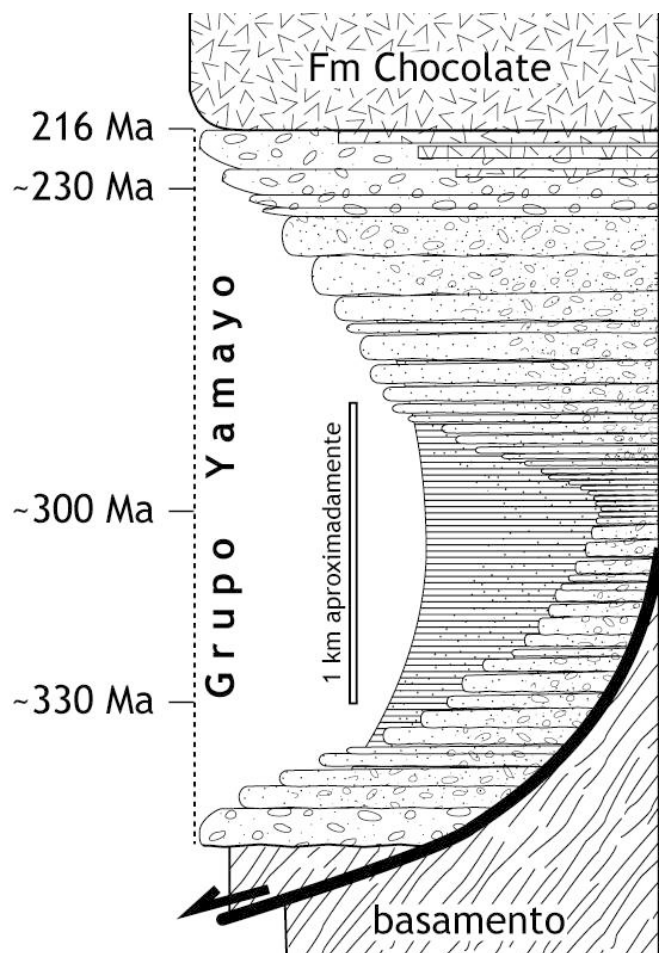


Figura 2. Columna sintética elaborada integrando observaciones estratigráficas en distintas secciones del Grupo Yamayo (Fig. 1).

### 2.1. Región de Tacna

En la región de Tacna, el Grupo Yamayo está representado por la Fm Machani, cuyas secciones son incompletas por fallamiento. En la sección de Mal Paso, esta unidad consiste de una parte basal arenoconglomerádica, una parte inferior predominantemente lutítica, y una parte superior sobre todo arenosa (con algunas calizas). Wilson y García (1962), quienes la definieron, la asignaron tentativamente al Triásico por infrayacer a la Fm Junerata (= Chocolate) y por la presencia de "ostras" en sus calizas de la sección de Mal Paso. Sin embargo estos bivalvos fueron luego identificados como *Myalina pliopetina* (Salinas, 1985), especie del Pérmico basal (~299-290 Ma; Newell, 1942). Unas decenas de metros más abajo se recolectaron improntas de *Nothorhacopteris kellybelenensis* y *Tomiodendron* sp. (Pino et al., 2004), que en asociación

indicarían el Carbonífero "medio" (~335-325 Ma; Iannuzzi y Pfefferkorn, 2002). Pero los zircones detríticos más jóvenes de la sección de Mal Paso son del Triásico medio a superior (~239-230 Ma; Boekhout et al., 2013). En la sección de Estique Pampa, el tope del Grupo Yamayo (hasta ahora "Cabanillas") entregó un zircón detrítico de ~219 Ma y subyace a la ignimbrita basal de la Fm Chocolate, ahora datada en ~216 Ma (Boekhout et al., 2013), sugiriendo que no hubo hiato depositacional entre las dos unidades.

### 2.2. Área al noreste de Ilo

En la quebrada Osmore, unos 25 km al NE de Ilo, en estratos predominantemente lutíticos, típicos de la parte inferior del Grupo Yamayo, se hallaron improntas de plantas con "hojas lanceoladas y nervaduras finas dispuestas paralelamente a los bordes", que sugirieron tentativamente plantas cicadáceas del género *Pterophyllum* (Bellido y Guevara, 1963; Narváez, 1964). Este género de Bennettitales tiene un rango que va del Triásico superior (Carniano: ~228-216.5 Ma) al Cretáceo inferior (Pott et al., 2010), pero se lo encuentra con mayor frecuencia en el intervalo Triásico superior-Jurásico medio, y especialmente en el Triásico superior donde es a menudo el taxón dominante (Pott et al., 2007). Sin embargo, dado la determinación aproximativa y las confusiones posibles, tenemos que considerar la posibilidad alternativa de que estas hojas pertenezcan sea a otros géneros de Bennettitales, las cuales aparecieron en el Triásico, sea al grupo de las Cycadales, que lo hicieron en el Pérmico inferior (o Carbonífero terminal, es decir alrededor de ~300 Ma), lo que de todas maneras excluye que sean más antiguas que el Pensilvaniano. Dado que estas plantas provienen del Yamayo inferior, sugerimos en este trabajo que podrían más bien ser del Pérmico (o Pensilvaniano superior).

### 2.3. Áreas de Majes y Camaná

En Torán, pocas decenas de metros arriba del contacto con el basamento, areniscas micáceas rojizas, hasta ahora descritas como "Grupo Cabanillas", entregaron 26 zircones detríticos carboníferos, de los cuales los más jóvenes son de ~323 y ~316 Ma (Boekhout et al., 2013).

Unos 55 km más al SO, en la sección de la quebrada La Chira, se halló en limolitas oscuras una rica fauna marina de edad pensilvaniana (318-299 Ma; Gradstein et al., 2004), que comprende el goniatite *Pseudoparalegoceras amotapense* (indicando el Moscoviano inferior [Atokano: ~312-309 Ma]; Murray et al., 1960), y unos taxones típicos del Grupo Tarma del Perú central (A. Pardo, *in* Pecho y Morales, 1969).

### 2.4. Áreas de Ocoña y Atico

En la zona de Ocoña, el Grupo Yamayo está conformado por una espesa sucesión clástica rojiza, granocreciente, de origen aluvial, cuya base es una falla normal de bajo ángulo (Taipe, 2004). En esta serie se hallaron plantas determinadas como *Odontopteris* sp. y *Sphenopsida* indet., y consideradas como pensilvanianas (Morales, 1997; sin

embargo el género *Odontopteris* puede alcanzar el Pérmico inferior: Taylor et al., 2009), mientras que una muestra de arenisca entregó un zircón de ~340 Ma (Boekhout et al., en prensa).

Unos 12 km al norte de Atico, la parte basal, también fallada, de la misma potente sucesión rojiza granocreciente contiene algunas calizas marinas con fusulinas de tipo *Triticites* (Bellido y Narváez, 1960), género que indica el Pensilvaniano-Pérmico inferior.

### 2.5. Área al sureste de Chala

A lo largo de la costa entre Puerto Viejo y Punta Saguas, aflora una potente sucesión también granocreciente, que se inicia por lutitas y limolitas negras y remata con conglomerados muy gruesos, con clastos de basamento cuyo diámetro puede sobrepasar 1 m. En su parte basal (Puerto Viejo), se hallaron plantas (*Nothorhacopteris kellybelenensis*, *Tomiodendron* sp.) indicativas del Carbonífero "medio" (~335-325 Ma; Iannuzzi y Pfefferkorn, 2002), y — detalle interesante — cercanas a zircones de ~336-332 Ma. En su parte superior (Punta Saguas), los zircones más jóvenes son de ~239-233 Ma, confirmando que el Grupo Yamayo se extiende hasta el Triásico superior (Boekhout et al., 2013).

### 3. Sinopsis y conclusiones

Esta reseña paleontológica crítica y sobre todo estas edades sobre zircones detríticos indican en conjunto que el Grupo Yamayo se depositó desde por lo menos el Carbonífero "medio" (Viseano superior) hasta el Triásico superior, abarcando un largo intervalo de tiempo (al menos ~330-220 Ma). Pese a que se acumuló durante  $\geq 110$  Myr, no parece incluir discordancias o hiatos internos mayores en varias secciones. Por lo tanto el Grupo Yamayo resulta ser un equivalente temporal del conjunto formado por los grupos Ambo, Tarma, Copacabana y Mitu del Perú central, presentando sin embargo facies bastante distintas, en particular por la escasez de las calizas y por la existencia de depósitos de aguas marinas mucho más profundas (lutitas oscuras espesas, chert estratificado).

Consideraciones regionales sugieren que el Grupo Yamayo fue depositado en la cuenca de antearco que se extendía al suroeste del arco andino coetáneo (según su posición reconstruida por Mišković et al., 2009), y durante un período de intensa extensión de la margen como indicado por observaciones de campo muy claras (Taipe, 2004). En acuerdo con los datos estructurales y estratigráficos, edades termocronológicas preliminares (Wipf, 2006) indican que el basamento asociado se enfrió rápidamente en el Triásico superior-Jurásico inferior. Esta evolución tectónica marcadamente extensional se refleja en el hecho que el contacto del Grupo Yamayo con el basamento es a menudo una falla normal importante, y hasta una *detachment* de muy bajo ángulo (Taipe, 2004). Es de notar que estas estructuras extensionales han sufrido poca a ninguna inversión tectónica durante la evolución andina posterior. Dado que rasgos como lutitas oscuras, areniscas gruesas, y estructuras fuertemente

extensionales continúan hacia el SO, el área presentemente offshore debería presentar bastante interés para la exploración de hidrocarburos.

### Referencias

- Angiolini, L., Racheboeuf, P.R., Villarroel, C.A., Concha, A.E. 2003. Stratigraphy and brachiopod fauna of the Carboniferous El Imán Formation, Colombia. *Revista Española de Paleontología*, v. 18, p. 143-158.
- Bellido, E., Guevara, C. 1963. Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Clesesí. *Boletín de la Carta Geológica Nacional*, v. 5.
- Bellido, E., Narváez, S. 1960. Geología del cuadrángulo de Atico. *Boletín de la Carta Geológica Nacional*, v. 2.
- Boekhout, F., Spikings, R., Sempere, T., Chiaradia, M., Ulianov, A., Schaltegger, U. 2012. Mesozoic arc magmatism along the southern Peruvian margin during Gondwana breakup and dispersal. *Lithos*, v. 146, p.48-64.
- Boekhout, F., Sempere, T., Spikings, R., Schaltegger, U. Late Paleozoic to Jurassic chronostratigraphy of coastal southern Peru: Temporal evolution of sedimentation along an active margin. 2013. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 47, p. 179-200.
- Boucot, A.J., Isaacson, P.E., Laubacher, G. 1980. An early Devonian, Eastern Americas realm faunule from the coast of southern Peru. *Journal of Paleontology*, v. 54, p. 359-365.
- Chacaltana, C., Cerrón, F., Valencia, M. 2002. Nuevas evidencias devonianas en sedimentitas de la Cordillera Occidental (SO del Perú) con ocurrencia de *Phacops* (Trilobita) y *Acrospirifer* (Brachiopoda) y su implicancia en el análisis sedimentario y tectonoambiental. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 94, p. 5-16.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G. 2004. *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge Univ. Press, 610 p.
- Iannuzzi, R., Pfefferkorn, H.W. 2002. A pre-glacial, warm-temperate floral belt in Gondwana (Late Visean, Early Carboniferous). *Palaios*, v. 17, p. 571-590.
- Jenks, W.F. 1948. Geología de la hoja de Arequipa al 200,000. *Boletín del Instituto Geológico del Perú*, v. 9.
- Mišković, A., Spikings, R.A., Chew, D.M., Kosler, J., Ulianov, A., Schaltegger, U. 2009. Tectonomagmatic evolution of Western Amazonia: Geochemical characterization and zircon U-Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, v. 121, p. 1298-1324.
- Morales, G. 1997. Nuevos datos geocronológicos y bioestratigráficos del macizo antiguo de Arequipa. *Actas, IX Congreso Peruano de Geología*, p. 365-369.
- Murray, G.E., Furnish, W.M., Carrillo, J. 1960. Carboniferous goniatites from Caballeros Canyon, State of Tamaulipas, Mexico. *Journal of Paleontology*, v. 34, p. 731-737.
- Narváez, S. 1964. Geología de los cuadrángulos de Ilo y Locumba. *Boletín de la Carta Geológica Nacional*, v. 7.
- Newell, N.D. 1942. Lower Paleozoic pelecypods: Mytilacea. *University of Kansas Publications*, v. 10, p. 1-115.
- Olchanski, L.E. 1980. Geología de los cuadrángulos de

- Jaqui, Coracora, Chala y Chaparra. Boletín del INGEMMET, v. 34(A).
- Paredes, J. 1964. Estratigrafía del Paleozoico en la costa del Departamento de Arequipa. Arequipa, Universidad Nacional de San Agustín, tesis de grado, 110 p.
- Pecho, V., Morales, G. 1969. Geología de los cuadrángulos de Camaná y La Yesera. Boletín de la Carta Geológica Nacional, v. 21.
- Pino, A., Sempere, T., Jacay, J., Fornari, M. 2004. Estratigrafía, paleogeografía y paleotectónica del intervalo Paleozoico superior - Cretáceo inferior en el área de Mal Paso - Palca (Tacna). In: J. Jacay & T. Sempere (eds.), Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú, Sociedad Geológica del Perú, Publicación especial 5, p. 15-44.
- Pott, C., Miller, I.M., Kerp, H., van Konijnenburg-van Cittert, J.H.A., Zijlstra, G. 2007. Proposal to conserve the name *Pterophyllum* (fossil *Bennettitales*) with a conserved type. *Taxon*, v. 56, p. 966-967.
- Pott, C., McLoughlin, S., Lindström, A. 2010. Late Palaeozoic foliage from China displays affinities to Cycadales rather than to Bennettitales necessitating a re-evaluation of the Palaeozoic *Pterophyllum* species. *Acta Palaeontologica Polonica*, v. 55, p. 157-168.
- Reimann, C.R., Bahlburg, H., Kooijman, E., Berndt, J., Gerdes, A., Carlotto, V., López, S. 2010. Geodynamic evolution of the Early Paleozoic Western Gondwana margin 14°-17°S reflected by the detritus of the Devonian and Ordovician basins of southern Peru and northern Bolivia. *Gondwana Research*, v. 18, p. 370-384.
- Salinas, E. 1985. Evolución paleogeográfica del sur del Perú a la luz de los métodos de análisis sedimentológicos de las series del departamento de Tacna. Arequipa, Universidad Nacional San Agustín, tesis de grado, 205 p.
- Taipe, E. 2004. Détachements en extension et sédimentation: les bassins pennsylvaniens d'Atico et Ocoña (sud-Pérou). Toulouse, Université Paul-Sabatier, mémoire de DEA, 38 p.
- Taylor, T.N., Taylor, E., Krings, M. 2009. Paleobotany: The biology and evolution of fossil plants. Academic Press, 1252 p.
- Wilson, J.J., García, W. 1962. Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca. Boletín de la Carta Geológica Nacional, v. 4.
- Wipf, M. 2006. Evolution of the Western Cordillera and coastal margin of Peru: Evidence from low-temperature thermochronology and geomorphology. ETH Zurich, Ph.D. dissertation n° 16383, 152 p.