

Impacto en la red fluvial del levantamiento costero asociado a la subducción de la dorsal asísmica de Nazca (margen continental de Perú)

The Nazca aseismic ridge subduction, coastal uplift and impact on the fluvial network (Peruvian continental margin)

Pablo Martín Páez¹, Loreto Antón¹ y Gonzalo Zamora²

¹ Departamento de Ciencias Analíticas, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Paseo Senda del Rey, 9, 28040 Madrid. pmartin@ccia.uned.es y lanton@ccia.uned.es

² Repsol E&P. C/ Méndez Álvaro 44, 28045 Madrid. gzamora@repsol.com

RESUMEN

En la costa oeste de Perú tiene lugar la subducción de dorsal de Nazca a lo largo del margen continental peruano, acompañado de un desplazamiento lateral de la dorsal hacia el sur. Este proceso produce deformación on-shore, mediante la inversión de la plataforma y un levantamiento en forma de domo asimétrico que se va desplazando a lo largo de la costa acompañando la migración de dorsal. El análisis morfométrico de la red de drenaje proporciona información cuantitativa útil para detectar anomalías asociadas a este proceso, como knickpoints en los tramos bajos o perfiles longitudinales con morfologías convexas o rectilíneas, y permite interpretar el alcance y la persistencia de estas señales en la red fluvial. Los resultados muestran una distribución casi simétrica de las morfologías fluviales a ambos lados del eje de la dorsal, indican que el levantamiento dinámico precede a la llegada de la dorsal y apunta a una relativamente rápida regularización y/o eliminación de las anomalías tras el paso del levantamiento activo.

Palabras clave: Geomorfología tectónica, fluvial, índices, subducción, levantamiento tectónico.

Geogaceta, 69 (2021), 43-46
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

La subducción de la placa de Nazca-Farallón bajo la placa sudamericana ha controlado la geodinámica de los Andes centrales desde el Mesozoico (James, 1971; Hampel, 2002). Desde el Neógeno, la subducción oblicua de la dorsal asísmica de Nazca (250 km de anchura y 1.5 km de elevación; Hampel, 2002) ha dado lugar a una zona de subducción subhorizontal que ha ejercido un control no solo en la morfología de la costa, donde ha provocado el levantamiento de centenares de metros (Macharé y Ortlieb, 1992; Hampel, 2002), sino también en la posición del arco volcánico (Aleman, 2006), en la evolución de los Andes centrales (e.g. Ramos y Folguera, 2009) y en las cuencas de foreland (e.g. Espurt *et al.*, 2007).

Hampel (2002) estima que la dorsal comenzó a subducir hace 11.2 Ma en los 11° S; sin embargo, otros autores estiman edades más antiguas (Rosebaum *et al.* 2005). La dorsal de Nazca ha migrado de norte a sur hasta su posición actual entre los 14 y 16°S, con una velocidad decreciente, 75 mm/a antes de los 10.8 Ma, ~0.4 mm/a durante los últimos 5 Ma (Macharé y Ortlieb, 1992; Hampel, 2002).

La subducción de la Dorsal de Nazca ha ido acompañada de una inversión de la plataforma oceánica, dando lugar al levantamiento del denominado Batolito de la Costa (Macharé y Ortlieb, 1992) y la posterior subsidencia de la zona costera tras el paso de la dorsal (Viveen y Schlunegger, 2018).

En la zona de Ica (14-16°S), donde la subducción está actualmente activa,

ABSTRACT

In the western margin of Peru the subduction of the Nazca Ridge along the Peruvian margin occurs together with the southward lateral motion of the ridge. During this process deformation of the upper part of the coastal region occurs, producing the inversion of the continental shelf and uplift of the coastal area, in the shape of an asymmetrical dome structure, simultaneously to the southward migration. The morphometric analysis of the drainage network provides quantitative data for the identification of anomalies in the fluvial system associated to this process, such as knickpoints in the lower reaches or convexities in the long profiles, and allow the interpretation of its impact and the length of the signals in the fluvial system. Uplift along the coast precedes the ridge arrival. Results illustrate a symmetrical distribution of fluvial morphologies on-shore, in both sides of the ridge subduction zone, and point to a fast regularization or deletion of the anomalies once the active uplift have moved southward.

Key-words: Tectonic geomorphology, fluvial, indexes, subduction, uplift

Fecha de recepción: 27/06/2020
Fecha de revisión: 23/10/2020
Fecha de aceptación: 27/11/2020

se pueden observar terrazas marinas y sedimentos marinos emergidos de edad Plio-Cuaternaria. De acuerdo con Macharé y Ortlieb (1992) en un corte paralelo a la costa, las terrazas marinas Plio-Cuaternarias más elevadas están dispuestas formando un domo asimétrico cuyo punto más elevado son 900 m, indicando que la zona de Ica estaba sumergida y ha emergido por el efecto de la subducción del alto batimétrico que constituye la dorsal.

El presente trabajo aborda el análisis morfológico de la red fluvial, como elemento para identificar las señales tectónicas descritas en la zona, y su respuesta topográfica. Mediante la aplicación de índices geomorfológicos se caracteriza el drenaje de la zona y se identifican diversas anomalías en respuesta al progresivo desplazamiento de la dorsal hacia el sur.

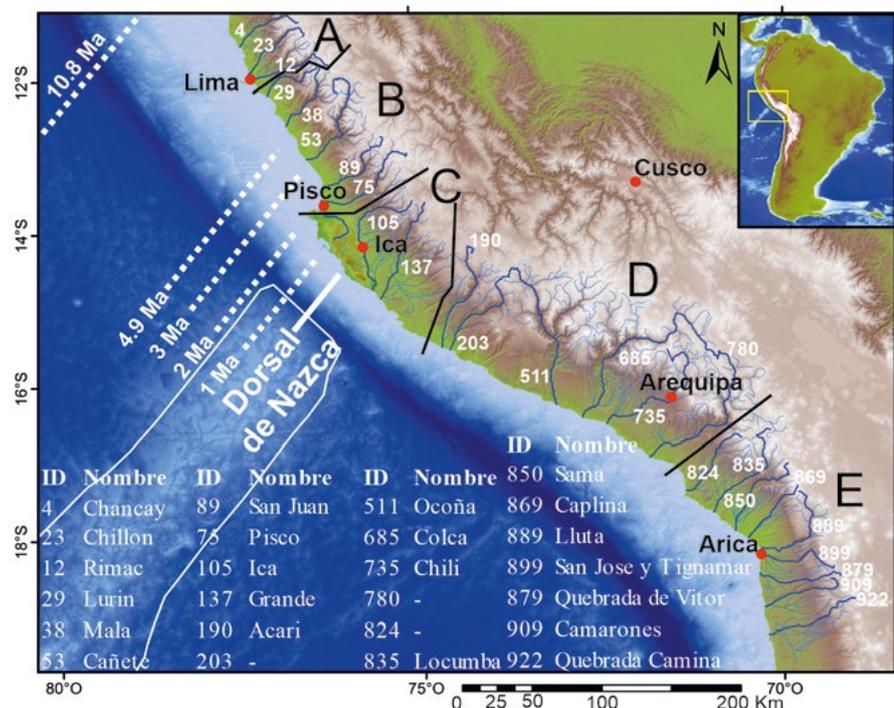


Fig 1: Mapa de localización del área de estudio en el que se representan los ríos analizados y las zonas en las que se han agrupado los ríos. La línea blanca continua indica la posición actual del eje de la dorsal, en discontinuo se muestra la posición del eje en diferentes épocas. Ver figura en color en la web.

Fig 1: Location map of the study area, it is represented the analysed rivers and the zones where the rivers where grouped. White line represents Nazca Ridge's axis, dotted lines are the position of de axis at different times. See color figure in the web.

Metodología

Como base para la extracción de los datos topográficos y de la red fluvial se ha empleado el modelo digital del terreno (MDT) del SRTM, con resolución de 90 m (Jarvis *et al.* 2008)

Mediante la herramienta FluNets desarrollada por Pastor-Martín *et al.* (2018) se ha generado la red fluvial de la zona comprendida entre los 11,5 y los 17°S, abarcando un área de unos 580.000 km² (Fig. 1). FluNets proporciona diversos atributos de los ríos (coordenadas, elevación, distancia a la cabecera, área de drenaje en cada punto y jerarquía de los ríos) que se han utilizado para la elaboración de mapas, perfiles longitudinales y cálculo de índices geomorfológicos de la red fluvial. Para el análisis se han seleccionado los 22 ríos de orden 1, de acuerdo con la clasificación de Hack (1957), con longitudes superiores a 100 km. De forma general los ríos principales nacen en los Andes y transcurren perpendicularmente a la línea de costa hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, mientras que la red de tributarios configura un patrón dendrítico (Fig. 1).

Mediante sistemas de información geográfica (ArcMap y Saga) se han extraído las cuencas de drenaje para los

ríos seleccionados y calculado la curva hipsométrica (HC) e integral hipsométrica (Hi) de las mismas (Strahler, 1952; Keller y Pinter, 2002). La curva hipsométrica describe la distribución de elevaciones en la cuenca, representa el porcentaje de área de una cuenca situada por encima o por debajo de una determinada altitud (Fig. 2a). La Hi es el valor del área bajo HC. El valor de Hi puede variar entre 0 y 1. De este modo, formas convexas de HC con valores altos de Hi indican que un porcentaje importante de la topografía se mantiene a cotas altas; apuntando a cuencas jóvenes donde la red fluvial no ha desmantelado el relieve o donde mecanismos externos están favoreciendo el rejuvenecimiento de éste.

Sin embargo, morfologías cóncavas de HC, y valores bajos de Hi se interpretan como cuencas maduras, donde la mayor parte de la topografía ha sido desmantelada. Entre estos dos extremos se pueden encontrar estadios evolutivos intermedios, representados generalmente por curvas sinusoidales.

A partir de los perfiles longitudinales de los ríos se ha calculado el índice de concavidad normalizado (nCi) que permite la cuantificación de la curvatura del perfil tomando como referencia

la línea que une cabecera y desembocadura (Demoulin, 1998, Antón *et al.* 2014, Soria-Jauregui *et al.*, 2019). Los valores de nCi varían entre -1 (formas muy convexas) y +1 (morfologías muy cóncavas, próximas a un perfil regularizado). Valores próximos a 0 representan perfiles con morfologías rectilíneas.

Resultados

Para los 22 ríos analizados, los valores de Hi varían entre 0.33 y 0.63, con curvas hipsométricas que presentan morfologías mayoritariamente cóncavas y sinusoidales (Fig. 2). El nCi varía entre -0.04 y 0.52. Los resultados se muestran en la Figura 2 y la Tabla I.

En base a los resultados se han diferenciado varias zonas a lo largo del tramo estudiado (Fig. 1 y 2).

En la zona A (Lima), situada al norte, la longitud de los ríos varía entre 120 y 159 km, con áreas de drenaje entre 1593 y 3280 Km². Las curvas hipsométricas presentan morfologías sinusoidales. Los valores de Hi varían entre 0.44 y 0.57 y nCi entre 0.28 y 0.35.

En la zona B (Pisco) la longitud de los ríos varía entre 138 y 242 km, con áreas de drenaje entre 2363 y 6116 Km². En esta zona las curvas hipsométricas tienen una morfología convexa con valores de Hi muy homogéneos entre 0.62 y 0.56. El nCi varía entre 0.19 y 0.31 (Tabla I).

En la zona C (Ica), donde actualmente se localiza la dorsal, se han analizado únicamente dos ríos, el Río Ica con Hi= 0.33 y nCi= 0.52, y el río Grande con Hi= 0.46 y nCi= 0.44. Estos ríos tienen una longitud de 250 y 189 Km, con áreas de drenaje de 8174 y 11246 Km², respectivamente. Una peculiaridad de estos ríos es que presentan *knickzones* en los tramos bajos. En el río Ica el *knickzone* afecta a los últimos 35 Km con un desnivel acumulado de 215 m. En el río Grande el desnivel es de 110 m a lo largo de los últimos 18 Km. El río Acarai, inmediatamente al sur, también presenta un *knickzone* de menor entidad, 45 m de desnivel en los últimos 5 Km (Fig. 1 y 2).

En la zona D (Arequipa) la longitud de los ríos varía entre 196 y 418 km, con áreas de drenaje entre 3500 y 17000 Km², y las cuencas de drenaje más grandes del área estudiada. Las curvas hipsométricas son convexas, y presentan valores de nCi entre -0.04 y 0.31 y de Hi entre 0.52 y 0.63. El valor negativo de nCi se asocia al

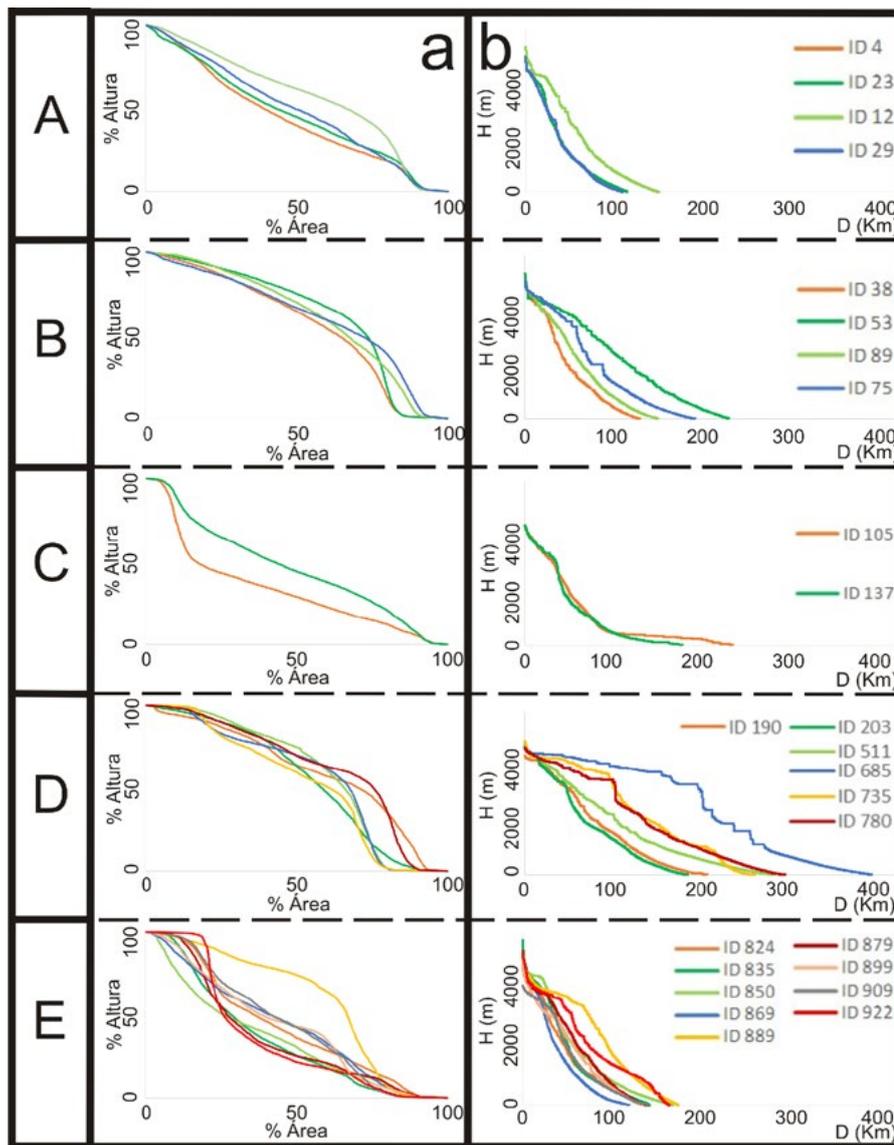


Fig 2: a) Curvas hipsométricas. B) perfiles longitudinales de los ríos, agrupados por la zona en la que se encuentran (ver figura 1). Ver figura en color en la web.

Fig 2: a) Hypsometric curves. b) River long profiles grouped by the areas shown in figure 1. See color figure in the web.

río (Colca, ID685), con un perfil muy convexo, que además es el de mayor longitud y área de drenaje (Tabla I).

Por último, la zona E (Arica) acoge ríos de longitudes comprendidas entre 127 y 213 km, cuencas de drenaje entre 1900 y 4880 km², y curvas hipsométricas sinusoidales (Fig. 2). En esta zona los valores de nCi varían entre 0.13 y 0.41 y Hi entre 0.31 y 0.58.

Discusión

La dorsal de Nazca constituye un alto batimétrico que subduce bajo la placa sudamericana, generando un levantamiento en la zona costera, con respuesta geomorfológica (Macharé y Ortlieb, 1992; Hample, 2002).

Mediante el análisis morfológico de la red fluvial se identifican anomalías en los perfiles longitudinales de los ríos o señales en los sistemas de drenaje en respuesta al levantamiento en forma de onda que se va desplazando a lo largo de la costa. El estudio aporta información semi-cuantitativa, sobre el impacto y el comportamiento de la red fluvial ante este proceso de subducción.

Los resultados muestran una cierta simetría en las características de las redes de drenaje a ambos lados de la zona de Ica (C), donde la dorsal subduce actualmente (Fig. 1).

En las zonas más alejadas (A y E) no se han identificado *knickpoints* ni anomalías que puedan asociarse a la subducción de la dorsal. Los perfiles longitudinales cóncavos y los índices indican una alta

madurez y regularización (tendencia al equilibrio) de los sistemas fluviales.

La elevación y el hundimiento generados por paso de la dorsal son efectos temporales (Krabbenhöft *et al.*, 2004), y los resultados apoyan la hipótesis de que tras el paso de la dorsal en el área que rodea Lima la red fluvial ha recuperado un estado de pseudoequilibrio; mientras que la zona de Arica aún está situada fuera de la zona de influencia de la anomalía.

En las zonas B y D, curvas hipsométricas convexas, perfiles irregulares e índices contrastan con los patrones de las zonas A y E (Fig. 2, Tabla 1), indicando una mayor anomalía con relación a lo que sería una cuenca estable con ríos regularizados, cuencas hidrográficas poco maduras, o rejuvenecidas, y perfiles longitudinales muy poco regularizados. Estos resultados parecen indicar que la anomalía causada por el paso de la dorsal aún está presente en la zona B. Mientras que las anomalías detectadas en la zona D, al sur de la posición actual del alto batimétrico, apuntan a que el levantamiento asociado a la sub-

Zona	Río	Hi	Ci	Área (km2)	L (km)
A	ID4	0.44	0.35	2580	120
	ID23	0.46	0.30	2296	143
	ID12	0.57	0.28	3280	159
	ID29	0.49	0.34	1593	115
B	ID38	0.56	0.31	2363	138
	ID53	0.62	0.19	6116	242
	ID89	0.61	0.24	4701	158
C	ID75	0.61	0.24	4039	201
	ID105	0.33	0.52	8174	250
	recortado	0.64	0.13	2186	142
D	ID137	0.46	0.44	11246	189
	ID190	0.61	0.21	4556	223
	ID203	0.55	0.28	3555	196
	ID511	0.59	0.31	16061	300
	ID685	0.56	-0.04	17049	418
E	ID735	0.52	0.04	13576	297
	ID780	0.63	0.13	13133	314
	ID824	0.43	0.31	3555	149
	ID835	0.31	0.39	4182	213
	ID850	0.35	0.35	4879	179
	ID869	0.42	0.41	1899	127
	ID889	0.58	0.13	3346	185
ID899	0.42	0.27	3321	142	
ID879	0.37	0.20	4651	149	
ID909	0.44	0.23	4651	150	
ID922	0.36	0.19	4723	175	

Tabla I: Valores de la integral hipsométrica (Hi), índice de concavidad normalizado (nCi), área de la cuenca (A) y longitud (L) para cada uno de los ríos analizados. Se incluyen los valores para el río Ica (105) que ha sido recortado (ver explicación en el texto). Para Hi y Ci las barras están representadas respecto a 1, para A y L respecto al valor más alto registrado. Ver figura en color en la web.

Table II: Values for Hypsometric integral, normalized Concavity index, watershed area (A) and river length (L). The river Ica (ID 105) with a shorter length is included (see explanation in the text). Bars are related to 1 for Hi and Ci, and to the highest value for A and L. See color figure in the web.

ducción de la dorsal se anticipa a la llegada de esta, como evidencian Macharé y Ortlieb (1992) por la disposición de las terrazas marinas Plio-Cuaternarias.

En la zona C los valores parecen indicar una gran madurez en las cuencas, con alta concavidad en los perfiles (Fig. 2, Tabla 1). Sin embargo, esta es la zona donde se esperan las tasas máximas de elevación costera, que pueden ir desde 0.4 m/ka a 0.9 m/ka durante el Pleistoceno (Saillard *et al.* 2011). Observando la topografía, geomorfología y geología, se evidencia que la zona de subducción reciente de la dorsal se expresa por un estrechamiento de la plataforma, un desplazamiento de la costa hacia el mar, y la elevación del batolito de la costa en respuesta a una elevación costera acelerada. Los tramos medios-bajos de los ríos estudiados transcurren a favor de un valle plano (Fig. 1 y 2B). El río Ica, presenta un cambio brusco de orientación hacia el SSE al salir de la cordillera de los Andes, fluyendo paralelo a la costa durante unos 100 km, a favor de la cuenca de Pisco. Este cambio está probablemente causado por el obstáculo que representa la reciente elevación de la zona y del Batolito de la Costa (Macharé y Ortlieb, 1992). Esta modificación en los tramos bajos da lugar a valores de n_{Ci} e H_i compatibles con ríos maduros, no esperables en zonas de levantamiento activo. Para verificar esta hipótesis se han recalculado los índices para el río Ica, eliminando el tramo que transcurre por la cuenca de Pisco. Los valores obtenidos ($H_i=0.64$ y $C_i=0.13$) están en consonancia con los de las zonas limítrofes y son coherentes con zonas de levantamiento activo (Tabla 1).

La presencia de *knickpoints* en los tramos finales de los ríos también apoya esta hipótesis. Los descensos del nivel de base (por levantamiento en este caso) dan lugar a una onda de incisión que se propaga aguas arriba en forma de *knickpoints* (e.g. Crosby *et al.*, 2005). En la zona estudiada, solo se han identificado *knickpoints* en los ríos Ica, Grande y Acarai, y estos presentan un descenso progresivo del salto y del retroceso respecto a la costa de norte a sur (Ica > Grande > Acarai), consistente con el desplazamiento progresivo del levantamiento hacia el S. De modo que en el río Ica el levantamiento se inició antes y la propagación de la erosión remontante ha avanzado más aguas arriba, generando un *knick-*

point mayor. La presencia de un *knickpoint* en el río Acarai apoya la idea de que el levantamiento afecta a una zona situada varias decenas de kilómetros al sur del eje de la dorsal (Macharé y Ortlieb, 1992; Saillard *et al.* 2011). Mientras que, en la zona de Pisco, al norte, no se detectan *knickpoints* en los tramos bajos, bien porque esta señal ha sido borrada, o porque tras el paso de la dorsal procesos de subsidencia (Viveen y Schlunegger, 2018) han sumergido la zona costera por donde transcurrían los tramos bajos (Fig. 1).

Conclusiones

Mediante análisis morfológico de la red fluvial se ha estudiado el impacto de la subducción de la dorsal asísmica de Nazca en la costa peruana, en zona compeñida entre los 11,5 y los 17°S.

El análisis morfológico y morfométrico ha permitido identificar 5 zonas con características similares que se distribuyen simétricamente a ambos lados de la dorsal.

Los resultados evidencian mayores anomalías, en forma de *knickpoints*, convexidades en los perfiles longitudinales y grado de madurez de las cuencas hidrográficas, en la zona de Ica, donde actualmente subduce la dorsal, y al sur de esta (Arequipa), apoyando la idea de que la deformación on-shore se anticipa al paso de la dorsal (Macharé y Ortlieb, 1992; Hampel, 2002, Martinod *et al.*, 2013). Hacia el norte algunas de las señales han desaparecido tras el paso de la dorsal (p.ej. ausencia de *knickpoints* en la zona de Pisco). Mientras que en las zonas más alejadas (Lima y Arica) no se detectan anomalías que puedan asociarse al proceso estudiado, bien porque éstas han sido eliminadas (zona A) o porque la zona está aún fuera de la influencia de la dorsal (zona E).

Agradecimientos

El contrato de Pablo Martín Páez como Ayudante de Investigación ha sido financiado por la UNED en el marco del Programa de promoción del empleo juvenil. El trabajo se enmarca en el proyecto PGC2018-095999-B-I00. Agradecemos a los editores y revisores, Antonio Teixell y Julien Babault, su tiempo y contribución a la mejora del manuscrito.

Referencias

- Aleman, A. M. (2006). *Geological Society of America. Speciality Meeting 2*, 21 p.
- Antón, L., De Vicente, G., Muñoz-Martín, A. y Stokes, M., (2014). *Geomorphology* 206, 250–261.
- Crosby, B.T., y Whipple, K.X. (2006). *Geomorphology*, 82, 16–38.
- Demoulin, A., (1998). *Geomorphology* 24, 189–208.
- Espurt, N., Baby, P., Brusset, S., Roddaz, M., Hermoza, W., Regard, V., Antoine, P. O., Salas-Gismondí, R. y Bolaños, R., (2007). *Geology* 35, 515–518.
- James, D. (1971). *Geological Society of America Bulletin.*, 82 (12), 3325-3346.
- Krabbenhöft, A., Bialas, J., Kopp, H., Kukowski, N. y Hübscher, C. (2004). *Geophysical Journal International*, 159(2), 749-764.
- Hack, J.T., (1957). Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, US Government Printing Office
- Hampel, A. (2002). *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 665-679.
- Keller, E.A. y Pinter, N., (2002). Active Tectonics. Earthquakes, Uplift, and Landscape. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Macharé, J. y Ortlieb, L. (1992). *Tectonophysics*, 205, 97-108.
- Martinod, J., Guillaume, B., Espurt, N., Faccenna, C., Funicello, F. y Regard, V. (2013). *Tectonophysics* 588, 39-55.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A. y Guevara, E., (2008). Hole-filled seamless SRTM data V4.
- Pastor-Martín, C., Antón, L. y Fernández González, C. (2018). *Geographia Technica* 13(2),114-124.
- Ramos, V. A. y Folguera, A. (2009). *Geological Society, London, Special Publications*, 327(1), 31-54.
- Rosembaum, G., Giles, D., Sazon, M., Betts, P.G., Weinberg, R. y Duboz, (2005). *Earth and Planetary Science Letters*, 239, 18-32.
- Saillard, M., Hall, S.R., Audin, L., Farber, D.L., Regard, V., Héral, G.(2011). *Geomorphology*, 128, 178-190.
- Soria-Jáureguía A., Jiménez-Cantizano, F. y Antón, L. (2019) *Quaternary Research*, 91(2), 472-492.
- Strahler, A.N., (1952). *Geological Society of America Bulletin* 63.
- Viveen, W. y Schlunegger F. (2018). *Tectonophysics* 730, 48–62.