



Cálculo de la elongación, dilatación y vectores de rotación de la deformación con algunas estaciones GPS en Colombia

Calculation of the elongation, dilatation and rotation vectors of the deformation with some GPS stations in Colombia

Camilo Andrés González-Parra¹, Robinson Quintana-Puentes², Luis Montes-Vides³

Para citar: C. A. González-Parra, R. Quintana-Puentes, L. Montes-Vides, "Cálculo de la elongación, dilatación y vectores de rotación de la deformación con algunas estaciones GPS en Colombia". *Revista Vínculos: Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol. 16, no. 2, pp. 262-269. DOI: 10.14483/2322939X.15749

Enviado: 12/07/19/ **Recibido:** 14/07/19/ **Aprobado:** 21/08/19

Resumen

La actividad sísmica que tiene Colombia, en especial Bogotá D.C., es alta por estar en una zona geológica muy activa. El documento es una investigación que muestra el cálculo de elongación, vectores de rotación y dilatación, combinando metodologías computacionales y ecuaciones de geología estructural; para ello, se usan las coordenadas y vectores de velocidad de las estaciones permanentes que pertenecen a la red del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. El área de estudio está delimitada por 37 estaciones permanentes ubicadas en el territorio colombiano, para calcular estas variables se usó la metodología del vecino más cercano y las ecuaciones de tensor de deformación y tensor de desplazamiento. Estas ecuaciones fueron programadas en el software Matlab debido a su destreza para trabajar en la solución de matrices, el resultado final de estos cálculos muestra que la zona de estudio se está desplazando en sentido nororiente, se deforma un máximo de $-1.6188^{-5}m/año$ la precisión se debe al uso de datos de Sistema de Posicionamiento Global.

Abstract

The following article shows the calculation of elongation, rotation vectors and dilation, combining computational methodologies and structural geology equations, using the coordinates and velocity vectors of the permanent stations that belong to the SIRGAS MAGNA-ECO network, the area of study is delimited by 37 stations of Colombia, to calculate these variables the methodology of the nearest neighbor and the equations of deformation tensor and displacement tensor were used. These equations were programmed in the Matlab software due to their ability to work in the matrix solution, the final result of these calculations shows that the study area is moving in the northeasterly direction, deforms a maximum of $-1.6188^{-5}m/year$ the accuracy is due to the use of Global Position System data.

Keywords: GPS, rotation rate, strain.

Palabras Clave: GPS, índice de rotación, tensión.

1. Ingeniero topográfico; estudiante de la maestría en Ciencias de la Información y la Comunicación Énfasis en Geomática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y la Universidad de Cundinamarca. Correo electrónico: camangonzalezp@correo.udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6705-7920>
2. Ingeniero Catastral y Geodesta; magíster en Geofísica; doctor en Geociencias, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: rquintanap@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-6203>
3. Físico; doctor en Geofísica, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: lamontesv@unal.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7470-9202>

1. Introducción

Colombia es un país que se encuentra ubicado en una zona geológica muy activa. Hacia el occidente de la placa continental suramericana limita con la subducción de la placa de cocos y al norte con la placa Caribe, por lo que esta interacción genera esfuerzos que deforman la placa continental.

¿Cuál es el estado actual de las deformaciones geológicas en Colombia? Para responder a esta pregunta se usaron los datos de coordenadas y velocidades de desplazamiento de la red geodésica SIRGAS en Colombia; luego, se elaboraron los mapas de deformaciones y ángulos de rotación de la deformación para el territorio colombiano [1].

La Sabana de Bogotá es un apretado sinclinorio fallado con rumbo SSW-NNE en el centro y la cresta de la Cordillera Oriental, en rocas sedimentarias del Cretáceo medio hasta el Cuaternario: el grupo Villeta y las formaciones Guadalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme, Tilatá, Sabana y Tunjuelo. Las formaciones Tilatá (Plioceno), Sabana (Plioceno, Pleistoceno y Holoceno) y Tunjuelo (Pleistoceno y Holoceno) son depósitos lagunares, fluviales y fluvio-glaciares depositados en el centro y en los bordes de la cuenca durante los últimos 3.5 millones de años [2].

Las coordenadas que se usaron son elipsoidales, las épocas de las coordenadas son del 2018, estas coordenadas son ajustadas cada quince días, por lo que tienen alta precisión. Los datos se descargaron de la página web de SIRGAS en formato ϕ , λ y las velocidades en metros [3].

La deformación de las rocas en Colombia se mide calculando el desplazamiento, la dilatación y los vectores de rotación de las estaciones de observación GPS, esto debido al esfuerzo generado por la interacción de las tres placas relacionadas, el cual no se puede medir directamente, pero que sí se puede calcular basándose en las deformaciones para el territorio colombiano [4].

Con este estudio se determinaron los valores que indican dónde se producen las mayores deformaciones y, por tanto, los sitios donde pueden existir peligros de deslizamientos de tierra, también la capacidad del terreno para construir infraestructura. Esta información se puede utilizar para los planes de ordenamiento territorial, ajustar la red geodésica nacional, entre otros proyectos.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) es un sistema de radionavegación de los Estados Unidos de América basado en el espacio, el cual proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación y cronometría gratuita e ininterrumpidamente a usuarios civiles en todo el mundo. A todo el que cuente con un receptor del GPS, el sistema le proporcionará su localización y la hora exacta en cualesquiera condiciones atmosféricas, de día o de noche, en cualquier lugar del mundo y sin límite al número de usuarios simultáneos [5].

El GPS se compone de tres elementos: los satélites en órbita alrededor de la Tierra, las estaciones terrestres de seguimiento y control, y los receptores del GPS propiedad de los usuarios. Desde el espacio, los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican los receptores del GPS; ellos, a su vez, proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora local precisa.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Para realizar el estudio, se usaron estaciones permanentes de la red SIRGAS de funcionamiento continuo (SIRGAS-CON), estas estaciones están distribuidas en la zona central, norte y sur del país; se identificaron las coordenadas geodésicas y las velocidades de desplazamiento de estas estaciones, se usó el software Matlab para programar los tensores de deformación y desplazamiento, y se usó el código Gridstrain [5].

2.2. Área de estudio

El área de estudio está delimitada por 37 estaciones permanentes, algunas de ellas pertenecen al acueducto de Bogotá D.C., que tienen el nombre ABCC4, ABPD4 y ABPW, algunas al Instituto Colombiano Agustín Codazzi y otras al Servicio Geológico Colombiano (Figura 1).

Para la toma de la muestra, se seleccionaron 37 estaciones permanentes que se encuentren en funcionamiento con el fin de definir el área de estudio y cantidad de datos disponibles. Los datos se descargaron de la página en internet de SIRGAS [5].



Figura 1. Área de estudio
Fuente: elaboración propia.

2.3. Toma de muestra para el estudio

La muestra se presenta a lo largo de la Tabla 1.

Estación	Localización	Coordenadas elipsoidales		Velocidades elipsoidales	
		latitud	longitud	V-norte	V-este
ABCC 41939M001	Bogotá D.C.	4.66123433	-74.12692211	0.0132	0.0012
ABPD 41941M001	Bogotá D.C.	4.4765667	-74.09886814	0.0133	0.0007
ABPW 41940M001	Bogotá D.C.	4.68956953	-73.99511463	0.0121	0
AGCA	Aguachica	8.3150468	-73.59541897	0.0137	0.0057
APTO 41933S001	Apartadó	7.87778784	-76.63239055	0.0125	0.0113
ARCA	Arauca	7.08427648	-70.7585335	0.012	-0.0001
BEJA	Barrancabermeja	7.06063569	-73.87559183	0.0138	0.0042
BERR 41910S001	Puerto Berrio	6.49268434	-74.41030932	0.0136	0.0049
BNGA	Bucaramanga	7.10488853	-73.12374259	0.0143	0.0035
BOGA 41901M002	Bogotá D.C.	4.63868186	-74.07994934	0.0132	0.0011
BOGT 41901M001	Bogotá D.C.	4.64007399	-74.08093954	0.0132	0.0011
BQLA 41934S001	Barranquilla	11.0197094	-74.84964063	0.0122	0.0105
BUEN 41912S001	Buenaventura	3.88202357	-77.01042024	0.0131	0.0055
CALI 41903S001	Cali	3.3757875	-76.53256449	0.013	0.0041
CART 41902M001	Cartagena	10.3913352	-75.5338528	0.0113	0.0114
CASI 41914S001	Caucasia	7.98883909	-75.20003446	0.0124	0.0078
CUCU	Cúcuta	7.89845887	-72.48793951	0.0136	0.0025
DORA 41915S001	La Dorada	5.45384524	-74.66331316	0.0142	0.0039
FLOR 41916S001	Florencia	1.62026321	-75.6045022	0.0103	0.0017
FQNE 41936S001	Fúquene	5.46734393	-73.73480862	0.013	0.0016
GARA 41945M001	Garagoa	5.08133361	-73.36003751	0.0128	0.0006
IBAG 41918S001	Ibagué	4.42804535	-75.21472352	0.0146	0.0034
MEDE 41921S001	Medellín	6.19940497	-75.57891652	0.0135	0.0055
NEVA 41923S001	Neiva	2.93730109	-75.29303149	0.0125	0.002
PAMP 41944M001	Pamplona	7.38418314	-72.64778021	0.0137	0.0026
PERA 41905S001	Pereira	4.79249651	-75.68950933	0.0146	0.0042
POPA 41924S001	Popayán	2.44311463	-76.60120581	0.0119	0.0035
PSTO 41925S001	Pasto	1.21171191	-77.27708026	0.0114	0.006
QUIB 41926S001	Quibdó	5.69963759	-76.65673009	0.0138	0.0061
RIOH 41927S001	Riohacha	11.5132168	-72.86970159	0.0133	0.0105
SAMA 41928S001	Santa Marta	11.2252478	-74.18709284	0.0129	0.0101
SINC 41946M001	Sincelejo	9.31559146	-75.38768394	0.0109	0.011

TUMA 41929S001	Tumaco	1.82227446	-78.73041331	0.0113	0.0096
TUNA 41930S001	Tunja	5.53132945	-73.36388201	0.0132	0.0012
VALL 41906S001	Valledupar	10.4739667	-73.25196965	0.0136	0.0087
VIVI 41931S001	Villavicencio	4.07466203	-73.5839937	0.0119	-0.0013
ZARZ 41950M001	Zarzal	4.39657541	-76.06756737	0.0137	0.0051

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones permanentes consultadas abril del 2018

Fuente: elaboración propia.

2.4. Procedimiento de laboratorio

Se cargan los datos en Matlab y se procesan con el código Grinstrain [5]-[7], se corre y compila el programa para elaborar los mapas de deformación, elongación y ejes de rotación de los datos (Figura 2).

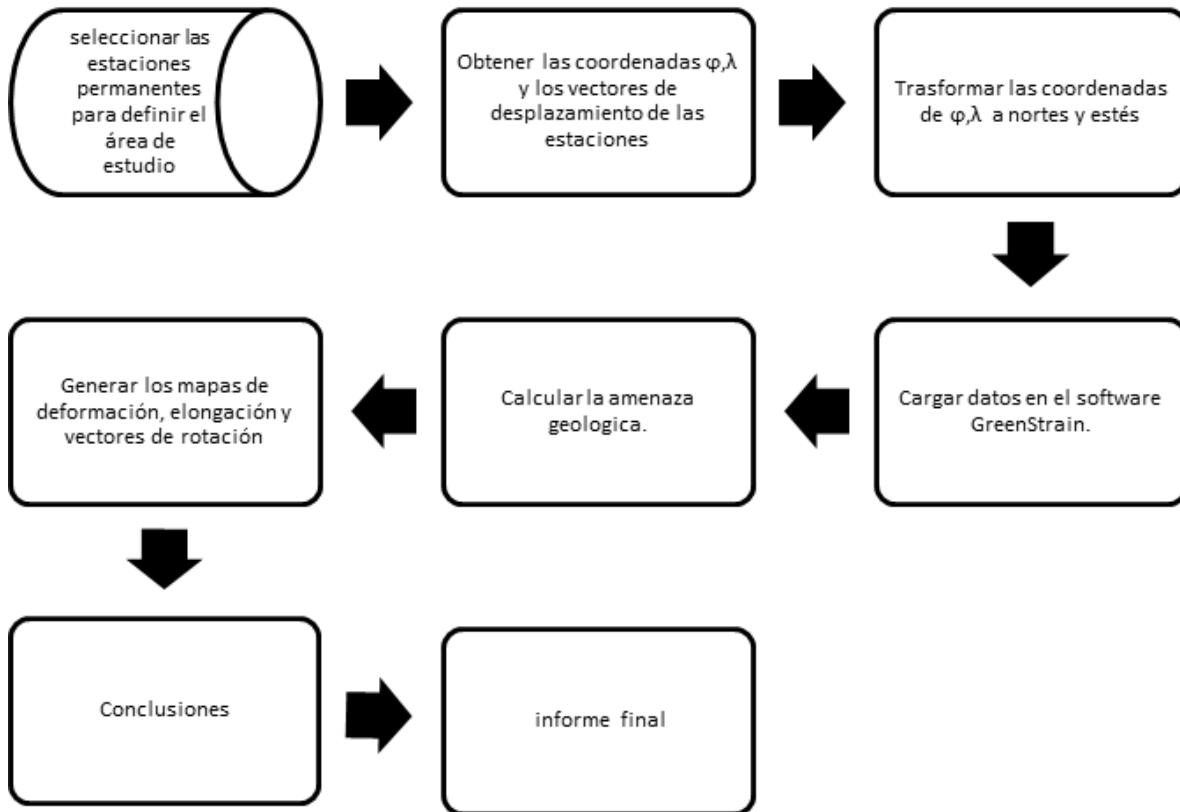


Figura 2. Diagrama de flujo metodología. **Fuente:** elaboración propia.

• Triangulación

El método de la triangulación consiste en usar las coordenadas latitud y longitud de mínimo tres estaciones, los vectores de desplazamientos y un escalar que corresponde al ángulo mínimo interno del triángulo a calcular; para este caso, se usó un ángulo mínimo de 10°, el resultado se llamó gradiente “e”, que varía a lo largo de la zona de estudio, este se calcula por el método de mínimos cuadrados [6].

• **Cálculo de máxima elongación (e)**

Para calcular la elongación se usó el método del vecino más cercano, se convirtieron las coordenadas en nortes y estes, el vector por el que se multiplico fue [0.11 10 16], que quiere decir 0.11 el espacio de la cuadrícula, 10 el número de vecinos cercanos y 16° el ángulo α o máxima distancia entre vecinos. Todas las unidades se expresan en metros [7].

• **Cálculo de los vectores de rotación y la dilatación**

Para calcular los vectores de rotación y la dilatación también se usó el método del vecino más cercano con la misma metodología de las coordenadas, desplazamientos y los mismos valores del vector [0.11 1], donde 0.11 es el tamaño de la grilla en grados y 1 en metros es la distancia ponderada [8].

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se fundamentaron en el análisis presentado a continuación. En la Figura 3, se muestra el cálculo de la deformación por el método de la triangulación.

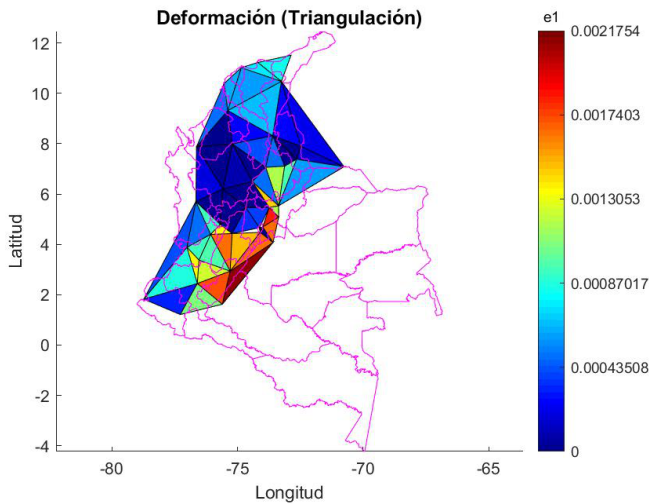


Figura 3. Deformación calculada por el método de la triangulación elaborado en Matlab con el código Grinstrain **Fuente:** elaboración propia.

En la Figura 3, se muestra la triangulación de las 37 estaciones permanentes de monitoreo GPS. Los valores que muestra la triangulación se expresan en metros, donde el color rojo indica el valor máximo de la elongación, para este caso 0.002 metros por año, y el color azul el valor mínimo de esta figura. Se observa que el mayor valor de elongación está

ubicado en la parte central del país, lugar donde se encuentran proyectos de infraestructura importantes como el edificio Bacatá, uno de los más altos, y el edificio Colpatria, estas deformaciones pueden afectar la cimentación de este tipo de estructuras. Estos datos permiten que al momento de hacer los cálculos de las estructuras se ajusten para que soporte esta deformación.

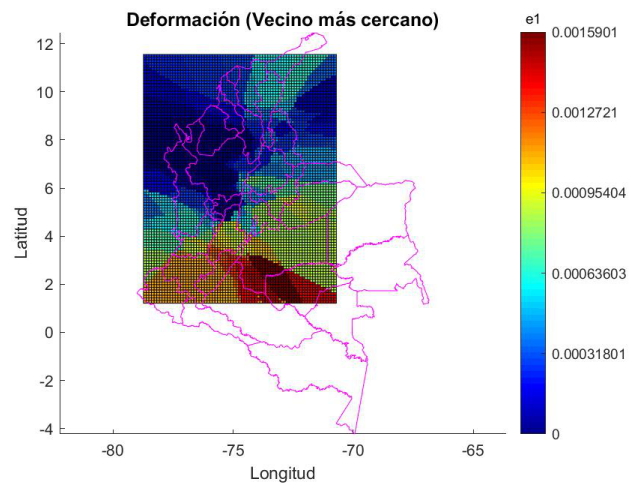


Figura 4. Mapa de elongación elaborado en Matlab con el código Grinstrain **Fuente:** elaboración propia.

En la Figura 4, se muestra el mapa de elongación usando los datos de las estaciones permanentes del país; la elongación es el cambio de forma o posición de una roca. El resultado muestra que la elongación máxima para el área es de 0.001 m/año, estos valores están en metros.

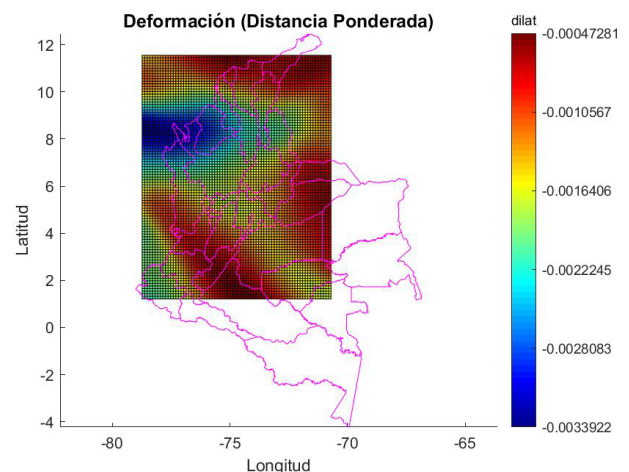


Figura 5. Mapa de dilatación elaborado en Matlab con el código Grinstrain **Fuente:** elaboración

En la Figura 5, se muestran los valores de dilatación de la roca en la zona de estudio. Se observa que la mayor dilatación está ubicada en la zona central del país con color rojo y un valor máximo de -0.0004m/año [9].

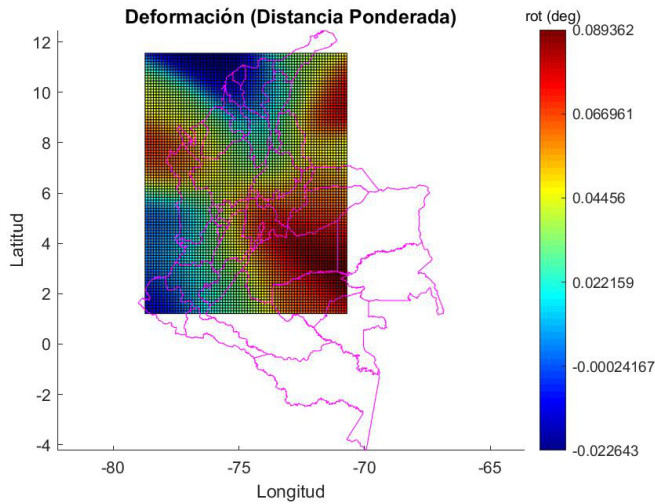


Figura 6. Rotación en radianes calculada por la distancia ponderada elaborado en Matlab con el código Grinstrain **Fuente:** elaboración propia.

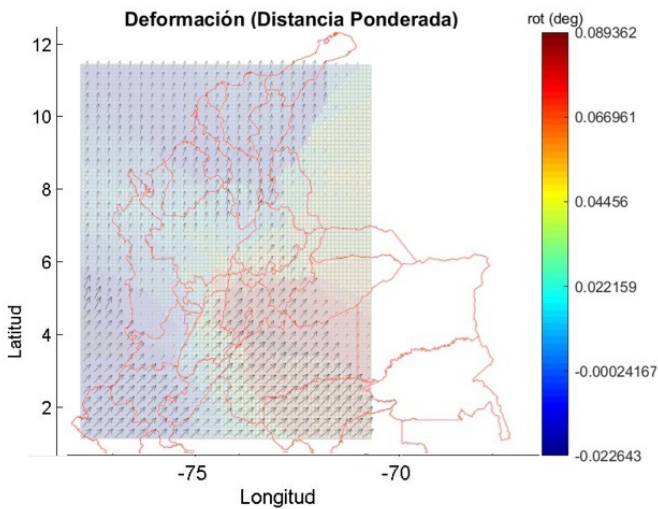


Figura 7. Vectores de Rotación elaborado en Matlab con el código Grinstrain **Fuente:** elaboración propia.

En la Figura 6 y la Figura 7, se muestra la dirección de desplazamiento de la deformación, es el ángulo con respecto al norte magnético; este valor está dado en ángulos decimales. El color rojo indica el mayor ángulo de rotación con respecto al norte que es de 0.08 en radianes y el color azul indica las zonas de

menor rotación que es de 0.02 en radianes.

4. Discusión

Debido a que Bogotá D.C. se ha convertido en una ciudad que alberga aproximadamente 8 380 801 de habitantes, es necesario que se realicen este tipo de estudios y se concatenen con los proyectos de infraestructura para garantizar que se ajusten las estructuras a este tipo de comportamientos de las placas tectónicas, ello con el fin de reducir los posibles riesgos por movimientos de tierra.

5. Conclusiones

Los vectores de rotación de las deformaciones indican que la zona de estudio, para este caso Bogotá D.C., se está deformando en dirección NE, con un ángulo máximo de 0.08 y un mínimo de 0.02, esto concuerda con el modelo de velocidades hecho por SIRGAS indicando el mismo sentido de desplazamiento.

La elongación indica que se debe estar monitoreando la zona donde se encuentran ubicadas las estaciones BOGT, BOGA, ABCC, ABPD y ABPW debido a que se presenta la mayor deformación y movimiento de masas del terreno, afectando la población aledaña a la zona; aquí se presenta un proceso llamado zona de convergencia, lo que muestra que Bogotá D.C. tiene una elongación negativa, es decir, su desplazamiento es cóncavo.

Colombia, por estar ubicada en el cinturón de fuego, presenta deformaciones significativas debido a los terremotos que se han tenido lugar en el pasado. Para el caso de Bogotá D.C., se está deformando un máximo de -0.0004 m/año esta precisión se debe a que los GPS, por manejar coordenadas infinitesimales, permiten calcular las deformaciones al milímetro; si se compara con otros métodos de calcular la deformación como la fotogrametría o imágenes satelitales, se evidencia mayor exactitud en la medida, un método más económico y más rápido de calcular.

Referencias

- [1] R. Allmendinger, N. Cardozo y D. Fisher, "Structural geology algorithms". Cambridge: British, 2012.
- [2] A. Lobo-Guerrero, "Logemin S.A". http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16_Geologia_hidrogeologia_Sabana_Bogota.pdf
- [3] E. Kendrick, M. Bevis, J. Smalley y B. Broock, "An integrated crustal velocity field for the central Andes", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 2, n.º 11, 2001. <https://doi.org/10.1029/2001gc000191>
- [4] R. Reilinger, S. McClusky y P. Vernant, "GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions" *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, n.º B5, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005jb004051>
- [5] Sirgas, "Sirgas". <http://www.sirgas.org/es/>
- [6] S. Lamb, "Vertical axis rotation in the Bolivian orocline, South America: 1. Paleomagnetic analysis of Cretaceous and Cenozoic rocks", *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, n.º B11, 2001. <https://doi.org/10.1029/2001jb900012>
- [7] P. Zhang et al., "Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global" *Geological Society of America*, vol. 32, n.º 9, pp. 809-812, 2004.
- [8] J. Adam et al., "Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques", *Journal of Structural Geology*, vol. 27, n.º 2, pp. 283-301, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.08.008>
- [9] N. Cardozo y W. Allmendinger, "Elsevier". <https://www.elsevier.com/locate/cageo>