

Caracterización geológica y geomorfológica de los lineamientos estructurales en las regiones de Irapuato, Silao y León, en el estado de Guanajuato: Implicaciones morfoestructurales

¹Salas-Vallejo, N., ¹Montiel-Sánchez, L.A., ²Pesántez-Cabrera, P.C., ¹Tovar-Ramírez, M.I., ¹Reyes-De la O, L.A., ¹Angeles-Moreno, E., ¹Miranda-Avilés, R., ¹Puy-Alquiza, M.J., ¹Loza-Aguirre, I., ¹Pooja Kshirsagar.

¹Universidad de Guanajuato, México

²Universidad de Cuenca, Ecuador

Resumen

La región de El Bajío es una cuenca sedimentaria y volcánica limitada por fallas geológicas que está ubicada en el límite tectónico sur de la Mesa Central de México. En este trabajo se realiza la caracterización geológica y geomorfológica de los lineamientos estructurales de las regiones de Irapuato, Silao y León que le dan forma a la región de El Bajío en su parte Norte a través de métodos cartográficos digitales, geológicos y geomorfológicos; este tipo de estudios es importante porque permiten determinar la relación que existe entre las geoformas del terreno con las fracturas y fallas geológicas que a su vez influyen en la geometría de cuencas sedimentarias, la geometría de acuíferos, en las direcciones de los flujos contaminantes del suelo, en la localización de deslizamientos y en el control espacial de fallas de subsidencia hídrica. El resultado de este trabajo muestra que la región Norte de El Bajío es definida por bloques mayores morfoestructurales en su periferia, bloques al interior y subcuencas (León, San Francisco del Rincón-Manuel Doblado, Silao-Romita y Cuerámaro) desarrolladas entre los bloques estructurales interiores. La topografía, expresión del paisaje, patrones de drenaje y erosión de la región es controlada por el fracturamiento y fallamiento desde el Eoceno hasta el Cuaternario. Los morfolineamientos representan lineamientos estructurales de fracturas y fallas, parteaguas en subcuencas, depresiones y altos estructurales, lineamientos de los cursos de ríos y lineamiento de centros de emisión volcánicos. Las relaciones geométricas entre el fallamiento y fracturamiento muestran un control sedimentario en las subcuencas de El Bajío determinando transiciones entre condiciones endorreicas a exorreicas. Así mismo la región Norte de El Bajío muestra direcciones de fracturamiento principales NE-SW, NW-SE, N-S y E-W que están influidas por las características estructurales de las provincias geológicas de la Mesa Central, Sierra Madre Occidental y Faja Volcánica Transmexicana.

Palabras clave: geomorfología, geología, morfoestructural, lineamientos estructurales, El Bajío

1. Introducción

La región de El Bajío en el sector entre Irapuato, Silao y León se encuentra en una cuenca sedimentaria y volcánica limitada por bloques estructurales y fallas geológicas (Botero-Santa et al., 2015; Angeles-Moreno, 2018; Del Río-Varela et al., 2020), algunas de estas fallas están ocultas en el subsuelo (Ramos-Leal et al., 2007), y otras fallas se pueden encontrar en algunos bloques de rocas que afloran en la región (Alvarado-Méndez y Rodríguez-Trejo, 1999; Angeles-Moreno, 2018; Gámez-Ordaz et al., 2019). En las regiones adyacentes a la región de El Bajío se han realizado estudios geológicos que muestran que la historia del fallamiento geológico extensional con fallas normales por lo menos ha ocurrido desde el Eoceno, Oligoceno y Mioceno (Nieto-Samaniego et al., 2005; Botero-Santa et al., 2015; Angeles-Moreno, 2018; Del Pilar-Martínez et al., 2020). Los lineamientos estructurales desde el punto de vista morfoestructural pueden estar asociados a la presencia de fallas geológicas que a su vez presentan fracturas relacionadas espacialmente. Los estudios morfoestructurales y de lineamientos estructurales se han desarrollado principalmente en la Sierra de Guanajuato (Nieto-Samaniego et al., 1992) y otros estudios de geología estructural en la región de San Felipe (Del Pilar-Martínez et al., 2020) pero hacia El Bajío no existen trabajos formales de lineamientos estructurales o morfoestructurales.

La identificación de fallas geológicas es importante dado que no existen trabajos que muestren, con precisión, su existencia y ubicación en varias depresiones de la región entre Irapuato y León. El estudio de estas nos puede proporcionar datos de cómo las fallas pueden controlar la geometría de los acuíferos en el subsuelo, de qué manera influyen en las direcciones de los flujos contaminantes en el suelo, así mismo es posible identificar cómo están relacionadas a algunos tipos de riesgos geológicos, por ejemplo, la subsidencia del terreno, terremotos, deslizamientos o las inundaciones. Para el caso de riesgos volcánicos es posible determinar si existe un control estructural con los centros de emisión de los volcanes. En la región de El Bajío existen importantes centros urbanos como las ciudades de San Francisco del Rincón, Irapuato, Silao y León, en algunas de ellas, como en Irapuato, se han detectado fallas de subsidencia hídrica (Coordinación Estatal de Protección Civil, 2012) que pueden estar controlados en su orientación a algunos lineamientos estructurales y fallas geológicas. En la región existe una sobreexplotación del agua subterránea

importante (Comisión Estatal de Agua de Guanajuato, 2018) que obliga a entender la geometría de las fallas geológicas para entender las geometrías de acuíferos en las subcuencas dentro de la región. En el presente estudio se determinaron los lineamientos estructurales con base en un análisis morfoestructural y estableciendo relaciones con algunos elementos geomorfológicos y geológicos como la altimetría, pendiente del terreno, erosión, tipo de relieve, litología y orientación de fracturas.

2. Metodología

Para la obtención de los datos de este trabajo se realizó investigación documental, cartográfica y geomorfológica relacionada con el área de estudio (Figura 1), se emplearon cartas topográficas de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía); algunas cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (Alvarado-Méndez y Rodríguez-Trejo, 1999; Gámez-Ordaz et al., 2019; Rosales-Soto y Camargo-Franco, 2019) y se utilizaron los softwares QGIS, ARCGIS y Stereonet (Allmendinger et al., 2012) para el procesamiento de datos cartográficos digitales. Se elaboraron los mapas digitales de modelo digital del terreno (MDT), modelo de relieve sombreado, modelo altimétrico, mapa de inclinación del terreno, mapa de densidad de corrientes lineales, mapa de la estimación de la intensidad de erosión y los bloques estructurales. El modelo de relieve sombreado, modelo altimétrico y modelo de pendientes se obtuvieron a partir del MDT generado a partir de cartas topográficas de INEGI con resolución de 15 metros, mediante la aplicación de herramientas de procesamiento en el software QGIS. El modelo de intensidad de erosión se empleó aplicando la fórmula universal de pérdida de suelo (*USLE* por sus siglas en inglés) mediante el software ARCGIS. El mapa de densidad de corrientes se obtiene considerando la sumatoria de la longitud de las corrientes entre el área de las subcuencas definidas en ARCGIS y empleando el método de interpolación Kriging. La interpretación de morfolineamientos se determinaron a partir de criterios geomorfológicos y geológicos por ejemplo la interpretación de parteaguas alineados, volcanes alineados, escarpes de posibles fallas y corrientes fluviales alineadas. A partir de la definición de morfolineamientos y de estos los lineamientos estructurales, se interpretaron los posibles bloques estructurales en la región.

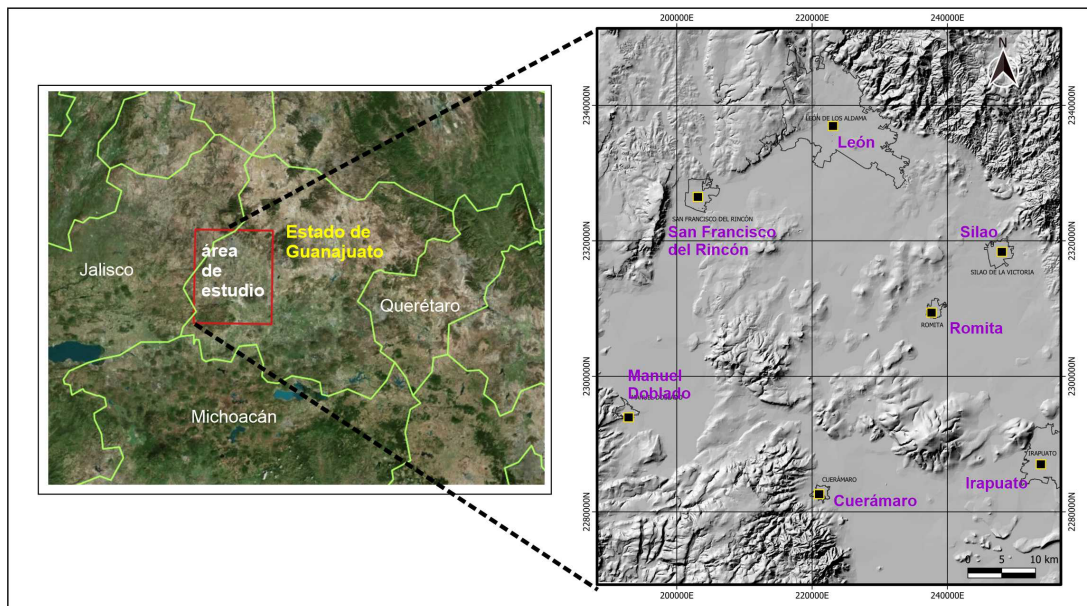


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el modelo de relieve sombreado. Proyección cartográfica UTM-WGS84 (Datos cartográficos fuente INEGI y GoogleEarth).

3. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización geológica y geomorfológica de los lineamientos estructurales en las regiones de Irapuato, Silao y León, en el estado de Guanajuato, permiten establecer los siguientes resultados en modelos digitales de terreno en altimetría, pendiente del terreno, tipo de relieve, erosión y morfolineamientos incluidos los lineamientos estructurales.

3.1 Altimetría y pendientes

El modelo altimétrico muestra tres principales bloques que limitan a la cuenca El Bajío entre Irapuato y León (Figura 2). Estos bloques son la Sierra de Guanajuato, la Sierra de Pénjamo y el bloque de San Francisco del Rincón-León. Estos bloques tienen una orientación general NW-SE y NE-SW. Las elevaciones mayores están en el bloque de la Sierra de Guanajuato sobrepasando los 2400 metros sobre el nivel de mar (m snm), y es seguida en elevación del bloque de Sierra de Pénjamo con elevaciones de 2200 a 2400 m snm. El modelo altimétrico muestra que en la región limitada por los bloques mayores existen bloques al interior con elevaciones menores de 1800 m snm a 2200 m snm. Los bloques internos dividen a la cuenca en subcuencas menores, estos bloques internos corresponden con la Muralla, Silao-Romita, Comanjilla e Irapuato (Figura 2B). El modelo altimétrico también permite observar que los piedemontes son más extensos en área adyacente al bloque NW-SE de la Sierra de Guanajuato y son más angostos en el oeste y suroeste en las regiones de la Sierra de Pénjamo, Manuel Doblado y en San Francisco del Rincón.

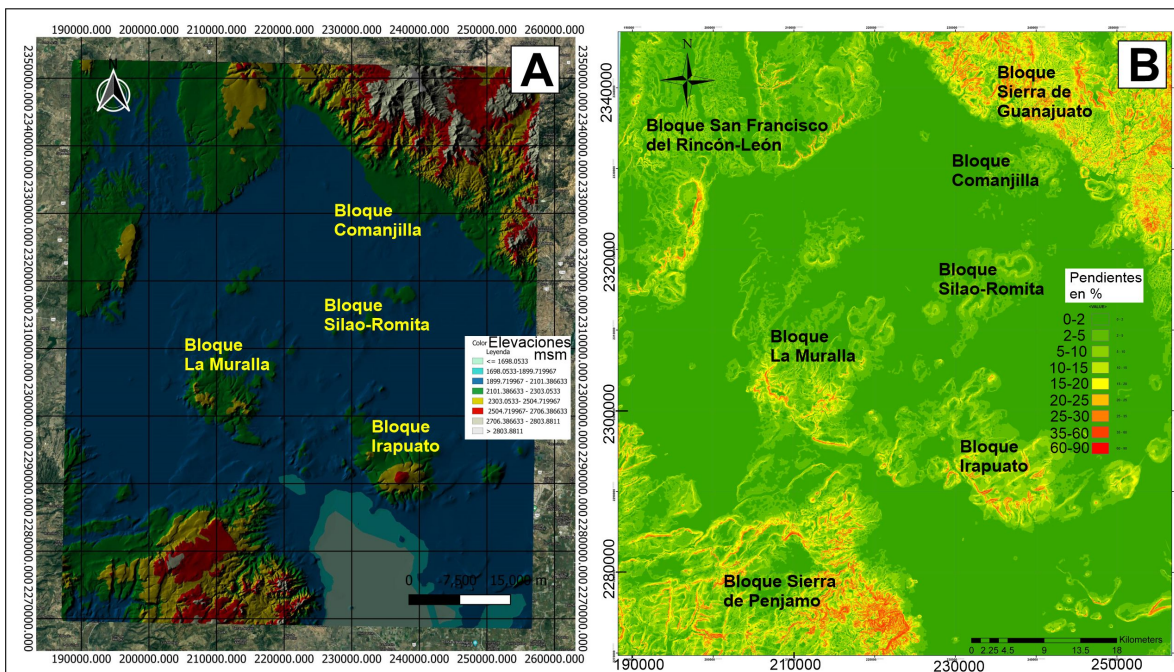


Figura 2. A) Modelo altimétrico que permite la definición de bloques en la región de El Bajío. B) Modelo de pendientes.

El modelo de pendientes del terreno (Figura 2B) permite ver que las mayores pendientes están en lineamientos estructurales que pueden ser posibles escarpes de falla en los bloques mayores y en bloques al interior de la cuenca mayor. En el bloque de la Sierra de Pénjamo se encuentran pendientes fuertes con direcciones NE-SW en la parte norte del límite de la sierra, y al interior se observan direcciones N-S y NW-SE. El bloque en San Francisco del Rincón-León es dominado por valores fuertes de pendientes con direcciones N-S que corresponden con el graben de San Francisco del Rincón (Gámez-Ordaz et al., 2019). En el bloque Sierra de Guanajuato los valores altos de pendientes tienen direcciones NW-SE principalmente. Los bloques interiores como la Muralla, Silao-Romita, Comanjilla e Irapuato presentan direcciones NW-SE y NE-SW.

3.2 Tipo de relieve y erosión

Los patrones de drenaje que se presentan en el bloque de la Sierra de Guanajuato son los dendrítico, paralelo, rectangular y subparalelo (Figura 3). El patrón paralelo muestra las corrientes de mayor orden con direcciones NE-SW. En el bloque de la Sierra de Pénjamo los patrones de drenaje son subparalelos, paralelos y de enrejado. Los patrones de drenaje que muestran mayor orden en sus ríos son los que tienen direcciones NE-SW y en menor medida las corrientes con direcciones NW-SE. En el bloque de San Francisco del Rincón-León se presentan patrones de drenaje subparalelos, paralelos y angular, estos patrones de drenaje son reflejo de lineamientos estructurales importantes y hay un fuerte control de la geometría por la presencia del graben de San Francisco del Rincón. La presencia de mayor densidad de drenaje en los bloques mayores muestra los valores en intensidad de erosión mayores. En los límites de los bloques interiores se presentan patrones de drenaje paralelos a subparalelos con direcciones NW-SE y NE-SW de los ríos de mayor longitud en su cauce estos en parte controlados por fracturas (Figura 3); al interior de estos bloques se presentan patrones de drenaje radiales y dendríticos que pueden ser controlados por la presencia de centros de emisión volcánicos. Los valores de erosión en estos bloques interiores muestran hacia los escarpes con direcciones NW-SE y NE-SW de los bloques la Muralla, Irapuato y Silao-Romita.

Las subcuencas limitadas por la presencia de los bloques interiores (la Muralla, Silao-Romita, Comanjilla e Irapuato) desde el punto de vista morfoestructural son la subcuenca de León, San Francisco del Rincón-Manuel Doblado, Romita-Silao y Cuerámaro. En estas subcuencas se presentan patrones de drenaje paralelo y dendrítico con grandes corrientes de longitud de más de 20 Km. En estas subcuencas la erosión de la superficie es menos intensa en grandes áreas y solo concentrada hacia los ríos mayores como por ejemplo el río Turbio.

La combinación del mapa altimétrico con el modelo de pendientes, los patrones de drenaje y densidad de erosión permiten determinar tres tipos de relieves en la región de El Bajío, relieve erosivo, relieve transicional y relieve de depósito. El relieve erosivo está definido por las superficies de los bloques mayores y los bloques estructurales al interior de la cuenca principal. El relieve de tipo depósitos de sedimentos está ubicado al interior de las subcuencas, en donde una mayor cantidad de patrones de drenaje está ausente ya que son controlados por ríos de mayor longitud. Y el relieve transicional corresponde a las pendientes de terreno en el pie de monte adyacente a los bloques estructurales, algunas tienen longitudes cortas por la posible presencia de fallas geológicas y otras pendientes tienen una prolongación en longitud mayor, estas últimas corresponden con las subcuencas en León y Romita-Silao.

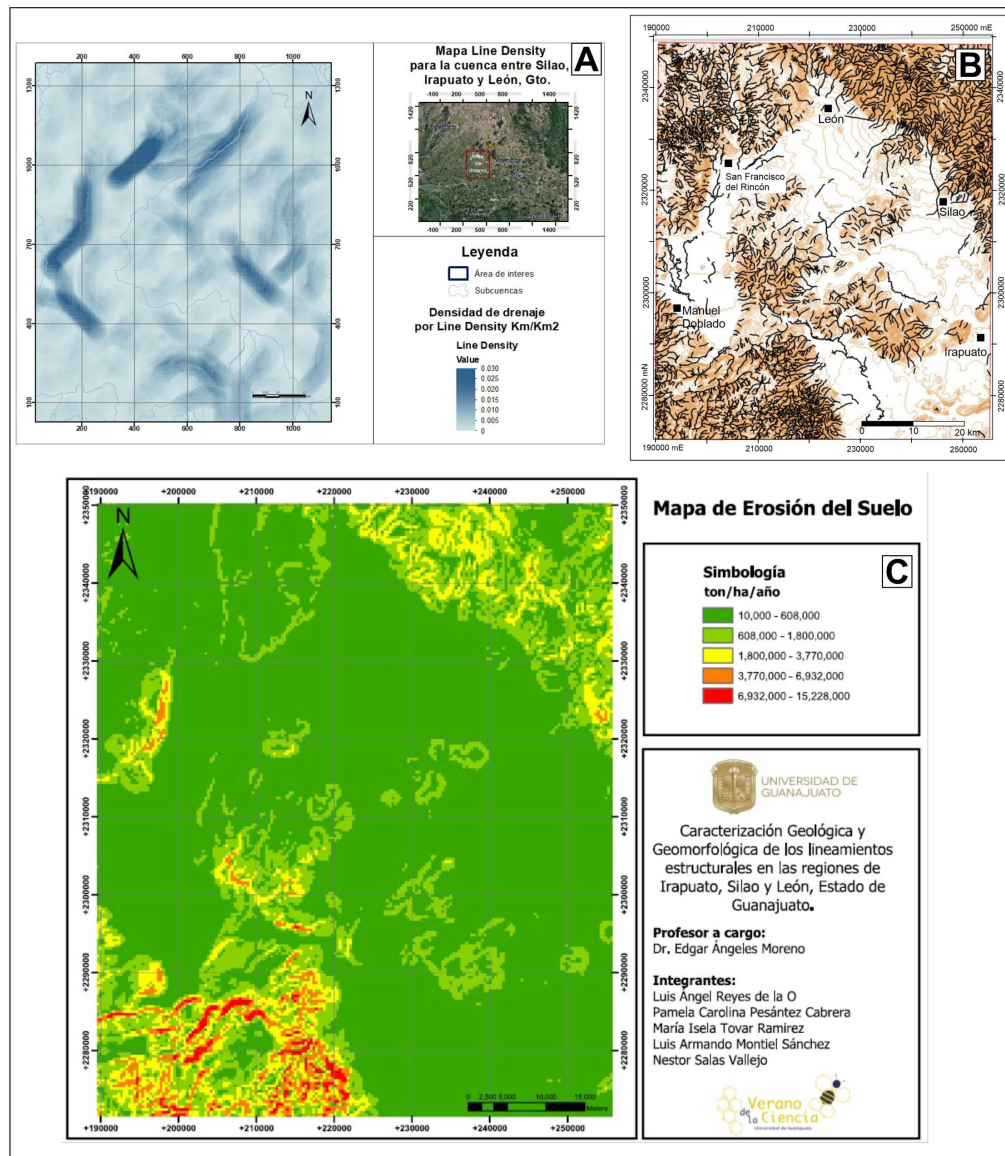


Figura 3. A) Modelo de densidad lineal, B) Patrones de drenaje, y C) Modelo de tasa erosión empleando ecuación universal de erosión del terreno.

3.3 Lineamientos estructurales y morfolineamientos

Los resultados expresados en los mapas de morfolineamientos muestran que éstos morfolineamientos están representados por lineamientos estructurales, que representan fallas geológicas de acuerdo con la cartografía del Servicio Geológico Mexicano (Alvarado-Méndez y Rodríguez-Trejo, 1999; Gámez-Ordaz et al., 2019; Rosales-Franco y Camargo-Soto, 2019) y otros de estos morfolineamientos representan escarpes de falla en los que no está definida su naturaleza geológica. Otros morfolineamientos coinciden con centros de emisión volcánicos en rocas volcánicas de edades del Mioceno y Cuaternario con direcciones NE-SW hacia el interior de los bloques estructurales del interior en la Muralla, Silao-Romita, Comanjilla e Irapuato (Figura 4). Algunos parteaguas de cuencas locales hacia el interior de las sierras en los bloques mayores que limitan a la cuenca de El Bajío muestran direcciones NW-SE y NE-SW.

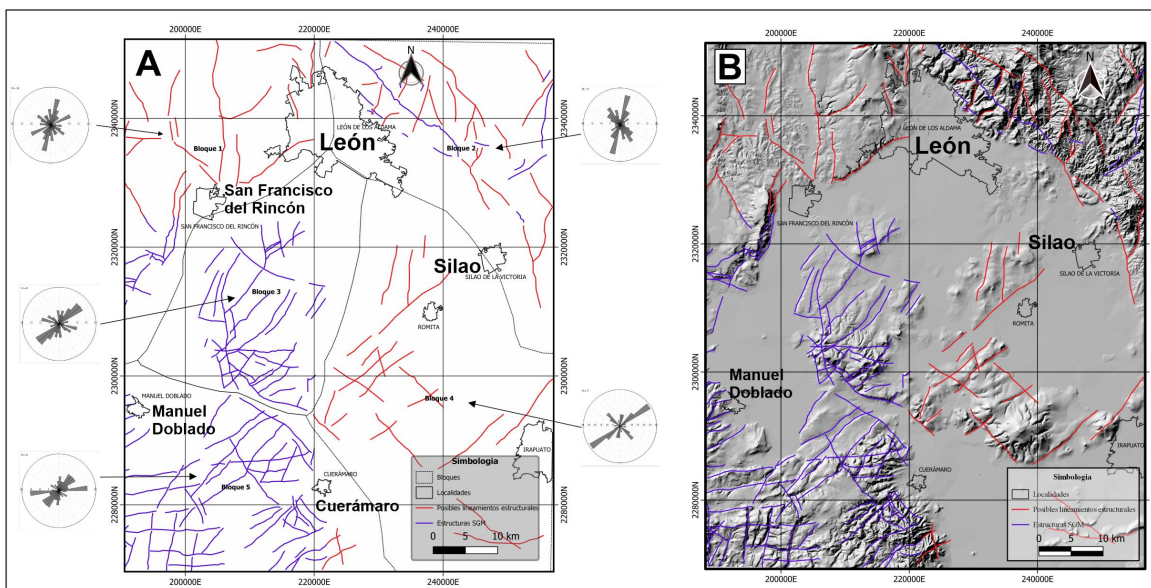


Figura 4. Morfolineamientos propios y compilados. A) Lineamientos estructurales y morfolineamientos con orientaciones en roseta principales. B) Morfolineamientos con el relieve sombreado de El Bajío. Algunos datos de fallas y lineamientos estructurales tomados de Alvarado-Méndez et al. (1999), Gámez-Ordaz et al. (2019) y Rosales-Franco y Camargo-Soto, (2019).

Las orientaciones de los morfolineamientos en el bloque de San Francisco del Rincón-León predominan las N-S y en menor medida las NE-SW. En el bloque de la Sierra de Guanajuato predominan las NW-SE y luego siguen las NE-SW y en el bloque de la Sierra de Pénjamo las orientaciones que dominan son las NE-SW y E-W con menor medida las N-S (Figura 4); es posible ver expresiones morfológicas de bloques escalonados en la parte norte de la Sierra de Pénjamo.

4. Discusión

La presencia de los bloques mayores morfoestructurales de San Francisco del Rincón-León, Sierra de Pénjamo y Sierra de Guanajuato (unidades morfológicas mayores) definen a la cuenca sedimentaria y volcánica de El Bajío como una cuenca compleja, con una geometría rectangular o poligonal orientada principalmente NW-SE en donde la topografía es controlada por fracturamiento y fallamiento. Esta geometría rectangular es reflejo de un control geológico-estructural como se ha encontrado en ambientes tectónicos con presencia de fallas extensionales (Geurts et al., 2020) y es probable reflejo de la naturaleza tectónica del límite sur de la Mesa Central de México (Nieto-Samaniego et al., 2005). El control estructural determina patrones de drenaje paralelos, subparalelos y rectangulares, así como la presencia de escarpes de falla con direcciones NW-SE, NE-SW y N-S en donde se dan valores de erosión muy altos debido a las pendientes mayores. La presencia de relieves transicionales asimétricos, siendo mayores en superficie en algunos bordes de los bloques mayores, implica que el fallamiento geológico determina la expresión morfológica de los pies de montes, por ejemplo el pie de monte del bloque de la Sierra de Guanajuato que es coincidente con el afloramiento de rocas mesozoicas implicando un mayor levantamiento tectónico, en donde se ha sugerido que el levantamiento en el Eoceno estuvo relacionado a una velocidad de exhumación muy rápida (Nieto-Samaniego et al., 2020).

Los bloques menores al interior de la cuenca determinan la subdivisión de 4 subcuencas (León, San Francisco del Rincón-Manuel Doblado, Silao-Romita y Cuerámara), esto por el control morfoestructural en sus límites; estos bloques además muestran conexiones hídricas estrechas y con geometría regular, determinadas por intersecciones de lineamientos estructurales. Estas conexiones hídricas complejas entre bloques pudieron controlar la evolución de subcuencas endorreicas y exorreicas, así como la evolución de los patrones de drenaje desde el tiempo Eoceno hasta el Cuaternario como se ha visto en cuencas extensionales (Geurst et al., 2020). Estos controles estructurales en las conexiones hídricas implican un control en la evolución del paisaje, así como un control sedimentario en las subcuencas de El Bajío.

Las direcciones de fracturamiento y fallamiento en la cuenca de El Bajío entre Silao y León muestran direcciones NW-SE, NE-SW y N-S principalmente, sin embargo, en el sector Sur en la Sierra de Pénjamo hay direcciones E-W. Las direcciones NW-SE, NE-SW y N-S se han documentado en el bloque de la Sierra de Guanajuato (Nieto-Samaniego et al., 1992), estas concordancias en direcciones implican una historia estructural en común que compartieron ambas regiones; sin embargo, en la cuenca El Bajío presentan una mayor continuidad y expresión las direcciones NE-SW y en la parte sur E-W lo que sugiere la influencia del régimen estructural de la Faja Volcánica Transmexicana (Angeles-Moreno, 2018).

5. Conclusiones

La caracterización geológica y geomorfológica de los lineamientos estructurales en las regiones de Irapuato, Silao y León, en el estado de Guanajuato implican que la cuenca El Bajío está definida por bloques mayores morfoestructurales, bloques al interior y subcuencas (León, San Francisco del Rincón-Manuel Doblado, Silao-Romita y Cuerámaro) entre los bloques interiores. La topografía, expresión del paisaje, patrones de drenaje y erosión de la región es controlada por fracturamiento y fallamiento desde el Eoceno hasta el Cuaternario. Las relaciones geométricas en el fallamiento y fracturamiento pudieron haber tenido un control sedimentario en las subcuencas de El Bajío determinando transiciones entre condiciones endorreicas a exorreicas. Los resultados pueden tener implicaciones en la distribución de los acuíferos, en los riesgos geológicos por derrumbes en escarpes de falla o distribución de fallas de subsidencia hídrica.

Agradecimientos

Al programa de Verano de la Ciencia de la Universidad de Guanajuato y a los profesores investigadores coautores revisores que participaron en la revisión y comentarios para mejorar este trabajo.

Bibliografía/Referencias

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors in Structural Geology*. Cambridge University Press, 289 pp.
- Alvarado-Méndez, H., & Rodríguez-Trejo, S. (1999). *Carta geológico-minera Nuevo Valle de Moreno, F14-C42, Guanajuato, escala 1:50000*. Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa con resumen de la geología.
- Angeles-Moreno, E. (2018). *La evolución tectónica cenozoica de las sierras de Guanajuato y Codornices, México*. Universidad Nacional Autónoma de México, doctoral thesis, 193 pp. http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TFE01000782969
- Botero-Santa, P.A., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., López Martínez, M., Levresse, G., Xu, S.-S., & Ortega-Obregón, C. (2015). Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana: *Revista Mexicana Ciencias de Ciencias Geológicas*, 32, 84-98. [http://satori.geociencias.unam.mx/32-1/\(08\)BoteroSanta.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/32-1/(08)BoteroSanta.pdf).
- CEAG. (2018). *Compendio del Agua Subterránea en Guanajuato*. Gobierno del Estado. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. Edición 2018.
- Coordinación Estatal de Protección Civil. (2012). *Informe de inspección a punto de riesgo geológico, ubicado en el Municipio de Irapuato, Guanajuato*. Secretaría de Seguridad Pública del estado de Guanajuato. <http://www.seguridad.guanajuato.gob.mx>
- Del Pilar-Martínez, A., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., & Angeles-Moreno, E. (2020). Geology of the southern Mesa Central of Mexico: recording the beginning of a polymodal fault system, *Journal of maps*, 16:2, 199-211. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1719911>
- Del Río-Varela, P., Nieto-Samaniego A., Alaniz-Álvarez S., Angeles-Moreno E., Escalona- Alcázar F., & Del Pilar-Martínez, A. (2020). Geología y estructura de las sierras de Guanajuato y Codornices, Mesa Central, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), A071019. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a071019>.
- Gámez-Ordaz, V., Zárate-López, E., Rodríguez-Cervantes, J.A., Salazar-Reyes, J., & Vázquez-Tortoleado, R. (2019). *Carta geológico-minera San Diego de Alejandría, F14-C51, Guanajuato y Jalisco, escala 1:50000*. Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa con resumen de la geología.

- Geurts, A.H., Whittaker, A.C., Gawthorpe, R.L., & Cowie, P. A. (2020). Transient landscape and stratigraphic responses to drainage integration in the actively extending central Italian Apennines, *Geomorphology*, Volume 353, 15., <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.107013>
- Lugo, J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*. México: Instituto de Geografía, UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/138>.
- Nieto-Samaniego, A.F., García-Dobarganes Bueno, J.E., & Aguirre-Maese, A.L. (1992). Interpretación estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la sierra de Guanajuato, *Revista del instituto de Geología de la UNAM*, vol. 10, núm. 1. P. 1-5.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., & Camprubí-Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Volumen Conmemorativo del Centenario, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII (3), 285-317. [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5703/ \(3\) Nieto.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5703/3/Nieto.pdf).
- Nieto-Samaniego, A.F., Olmos-Moya, M.J.P., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S.A., Abdullin, F., Del Pilar-Martinez, A., & Xu, S. (2020). Thermochronology and exhumation rates of granitic intrusions at Mesa Central, Mexico, *International Geology Review*, 62:3, 3011-319, DOI: 10.1080/00206814.2019.1602789.
- Ramos-Leal, J. A., Durazo, J., González-Morán, T., Juárez-Sánchez, F, Cortés-Silva, A., & Johannesson, K. H. (2007). Evidencias hidrogeoquímicas de mezcla de flujos regionales en el acuífero de La Muralla, Guanajuato: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (3), 293-305.
- Rosales-Franco, E. & Camargo-Soto. C. (2019). *Carta geológico-minera Manuel Doblado, F14-C61, Guanajuato y Jalisco, escala 1:50000*. Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa con resumen de la geología.