

# USO DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS PARA EVALUAR LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA: CASO DE ESTUDIO EN EL NORESTE DE MÉXICO

Iris Lucia Gauna-Sauceda<sup>1,\*</sup> & Juan Carlos Montalvo-Arrieta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Departamento de Geología, Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México*

<sup>2</sup> *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra. ExHacienda de Guadalupe km8. Carretera Linares – Cerro Prieto, C. P. 67700, Linares, Nuevo León, México*

\* [iris-gauna0719@hotmail.com](mailto:iris-gauna0719@hotmail.com)

## Resumen

La respuesta del terreno a procesos de deformación tectónica puede ser evaluada utilizando índices geomorfológicos. El objetivo de este estudio fue calcular la curva e integral hipsométrica (*HI*), el gradiente de la corriente (*SL*) y el índice de inclinación normalizado (*Ksn*) en dos microcuencas en el Noreste de México. Los resultados del índice *SL* y *Ksn* muestran una buena correlación con fallas activas propuestas en la región.

## Palabras clave

Neotectónica, geomorfología tectónica, índices geomorfológicos, análisis de perfil de corriente, Noreste de México

## Abstract

The response of landforms to tectonic deformative processes can be effectively understood by using geomorphic indices. The objective of this study was calculate the hypsometric integral and curve (HI), stream-length gradient index (SL) and the normalized steepness index (Ksn) in two micro-basins of the northeastern Mexico. The SL and Ksn index results show a good correlation with proposed active faults in the region.

## Keywords

Neotectonics; Tectonic geomorphology; Geomorphic indices; Stream profile analysis; northeastern Mexico

---

Gauna-Sauceda, I.L. & Montalvo-Arrieta, J.C. (2023): Uso de índices geomorfológicos para evaluar la actividad neotectónica: Caso de estudio en el Noreste de México. – en: Montalvo Arrieta, J.C., Ramírez Fernández, J.A., Aguilar-Madera, C.G., Jenchen, U., Salinas Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (eds.): Número especial en conmemoración del 90° Aniversario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del 40° Aniversario de la Facultad de Ciencias de la Tierra. – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, **9 (2023)**: 55-61.

## Introducción

La deformación continua de la corteza en regiones activas resulta en diversas modificaciones en la morfología del terreno, la red de drenaje y la cuenca, lo cual resulta en contrastes en el relieve, tasas de erosión diferencial, variaciones en la incisión de canales y cambios en el gradiente en arroyos (Aju et al., 2022).

Con el fin de evaluar la respuesta del medio a los procesos tectónicos comúnmente se realiza un análisis geomorfológico. Las mediciones cuantitativas del terreno están basadas en el cálculo de índices geomorfológicos utilizando mapas topográficos o modelos de elevación digital (MDEs), imágenes aéreas o satelitales, y trabajo de campo (Topal & Özkul, 2018).

Son diversos los índices geomorfológicos utilizados para comprender como el medio responde a las perturbaciones tectónicas, sin embargo a continuación solo describiremos brevemente los utilizados en este estudio.

## Curva e Integral Hipsométrica

La curva hipsométrica describe la distribución de la elevación a lo largo de un área. La curva es generada graficando la proporción de la altura total de la cuenca ( $h/H$ ) sobre la proporción del área total ( $a/A$ ) (Pérez-Peña et al., 2009; Figura 1).

Una forma simple de caracterizar la forma de la curva hipsométrica para una cuenca dada es calcular la integral hipsométrica, la cual establece una relación área-altura y se define como el área bajo la curva hipsométrica (Strahler, 1952; Schumm, 1956). La relación entre  $HI$  y el grado de disección permite inferir el estado de la cuenca dentro del ciclo de erosión (Keller & Pinter, 2002).  $HI$  se puede calcular usando la relación:

$$HI = \frac{Ep - Emin}{Emax - Emin} \quad (1)$$

donde  $Ep$  es elevación promedio,  $Emin$  es elevación mínima y  $Emax$ , elevación máxima. “ $HI$ ” tiene valores en el intervalo de 0 a 1 (Keller & Pinter, 2002).

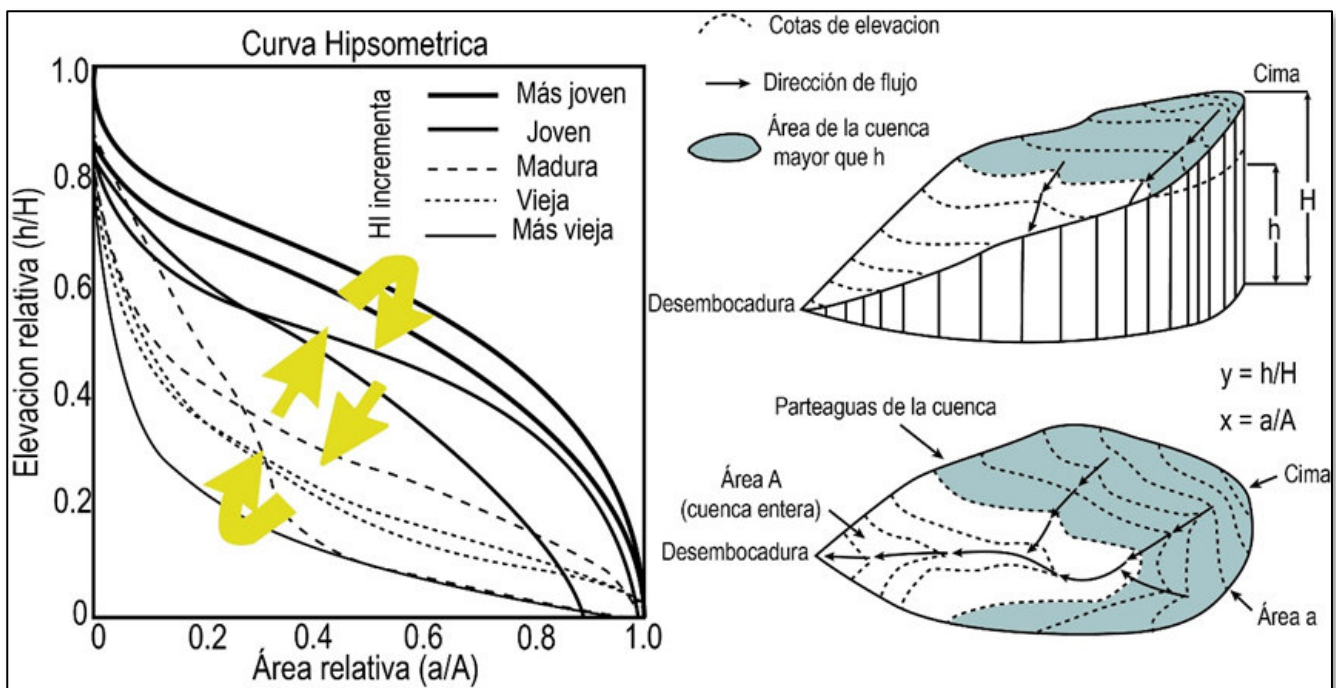


Figura 1: Curva e integral hipsométrica describe la relación de la elevación en un área determinada, y permite inferir el estado de la cuenca dentro del ciclo de erosión. Cuencas en estado “más joven” están representadas por curvas convexas y altos valores de “ $HI$ ”, estado “maduro” por curvas cóncavo-convexo o rectas, y “viejas” por curvas cóncavas y bajos valores de “ $HI$ ”.

## El índice de gradiente de la corriente (SL)

El índice  $SL$  describe la evolución topográfica y las variaciones abruptas en la elevación a lo largo del cauce del río debido a factores tectónicos, o a la resistencia variable de las

rocas y suelos sobre los que fluye (Keller & Pinter, 2002). El índice  $SL$  está dado por la relación:

$$SL = \left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \cdot \Delta L \quad (2)$$

donde  $\Delta H/\Delta L$  representa la pendiente o gradiente en un segmento de alguna corriente y  $L$  la longitud de la misma

corriente medida desde el centro del segmento aguas arriba hasta el parteaguas.

Este índice se correlaciona con la Ley de Flint (Flint, 1974) la cual describe que, bajo ciertas condiciones, un sistema de drenaje exhibe un potencial capaz de romper el equilibrio del río para conducirlo a una etapa de ajuste mediante procesos de incisión (Burbank & Anderson, 2001). En estado estable esta ley establece una relación donde el gradiente del canal ( $S$ ), se encuentra en función del el área de la cuenca río arriba ( $A$ ),  $\theta$  es el índice de concavidad y  $k_s$  es el índice de inclinación.

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (3)$$

$$k_s = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

La particularidad de esta ecuación es que  $k_s$  y  $\theta$  pueden ser estimados mediante regresión logarítmica de  $\log S$  y  $\log A$  (Kirby

& Whipple, 2012). Con el fin de intentar aislar únicamente los efectos tectónicos y erosivos sobre la morfología del cauce, se utiliza comúnmente una concavidad de referencia ( $\theta_{ref} = 0.45$ ), esto para remover el efecto de la concavidad sobre el índice de inclinación, lo cual a su vez deriva en un índice de inclinación normalizado ( $Ksn$ ) (Wobus et al., 2006), utilizando la siguiente ecuación (Snyder et al. 2000):

$$S = k_{sn} A^{-\theta_{ref}} \quad (5)$$

Adicionalmente, cuando el levantamiento no es igual que la erosión, la corriente ya no está sujeta a un medio estable y por lo tanto rasgos geomorfológicos característicos de medios en desequilibrio pueden ser desarrollados (i.e., *knickpoints*).

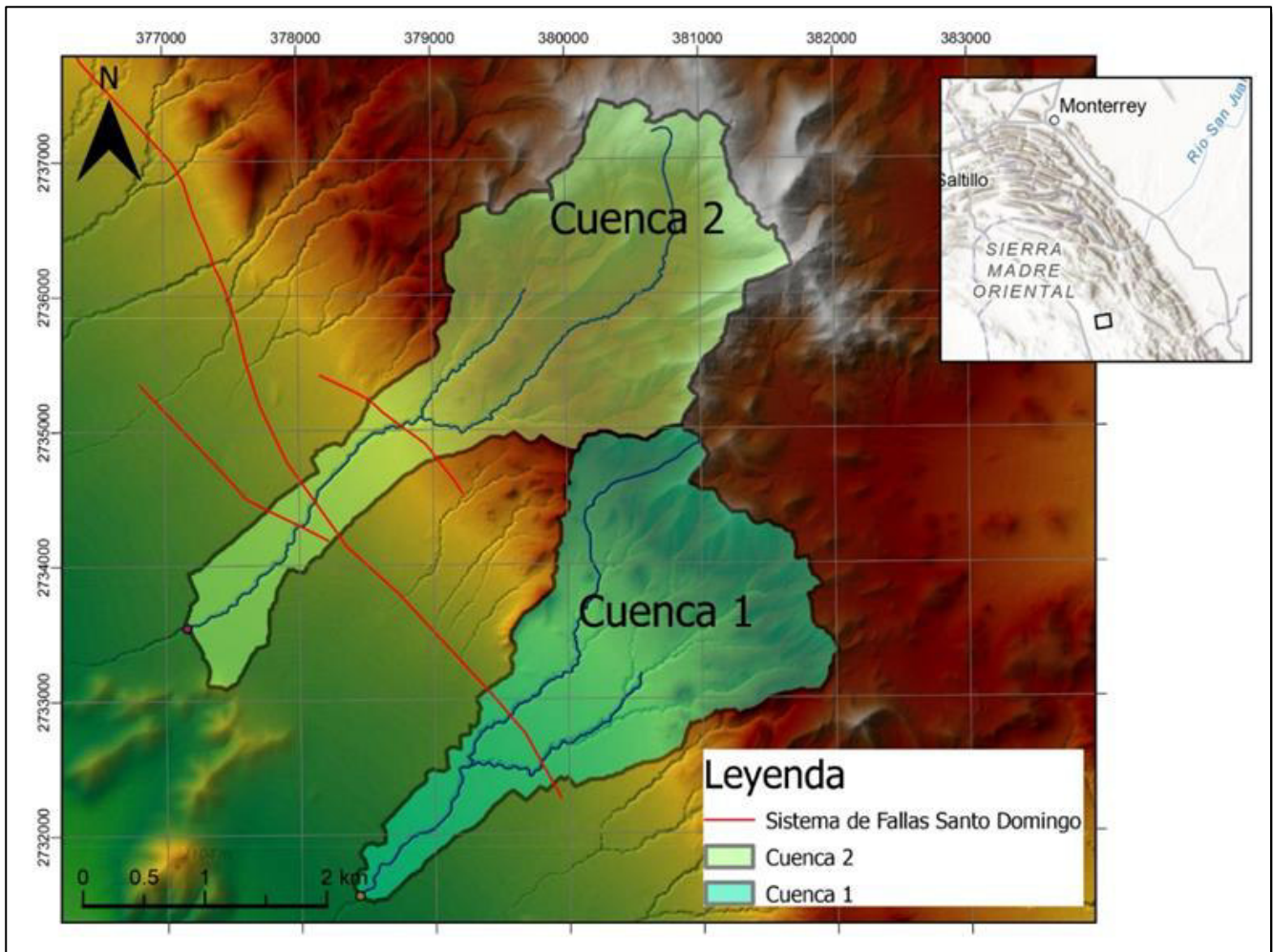


Figura 2: Microcuencas analizadas para la realización de este trabajo. La línea roja continua representa la traza sur del Sistema de Fallas Santo Domingo propuesto por Gauna-Sauceda et al. (2023).

## El Noreste de México como caso de estudio

En el noreste de México los estudios geomorfológicos son escasos. En Gauna-Sauceda et al. (2023) reportan los resultados para dos índices geomorfológicos (factor de simetría topográfica transversal y sinuosidad del frente de montaña) y el análisis estructural, y proponen que una porción del borde occidental de la Sierra Madre Oriental es moderadamente activa. Sin embargo, para un estudio puramente geomorfológico es recomendable calcular varios índices y es importante considerar el tiempo que le toma al sistema geomorfológico responder a los cambios impuestos por las fuerzas tectónicas, los cuales podrían incluso ir más allá del Holoceno (Burbank & Anderson, 2001) por lo

tanto, el medio podría encontrarse en una etapa de transición durante el tiempo de observación.

Considerando las aportaciones de Gauna-Sauceda et al. (2023), en este estudio se consideró calcular la curva e integral hipsométrica, el gradiente de la corriente ( $SL$ ) y el índice de inclinación normalizado ( $Ksn$ ) para 2 microcuencas en el NE de México (Cuenca 1 y Cuenca 2, Figura 2) ubicadas al noreste de Santo Domingo, Galeana, en el estado de Nuevo León. Las microcuencas fueron calculadas en ArcGis siguiendo el flujo de trabajo propuesto por Jaiswara et al. (2020). Los modelos de elevación digital (MDEs) tipo LiDAR con resolución de 5 metros fueron descargados de INEGI. Las claves de las cartas utilizadas son G14C56 con terminación D4, E3, E4, A2, B1 y B2.

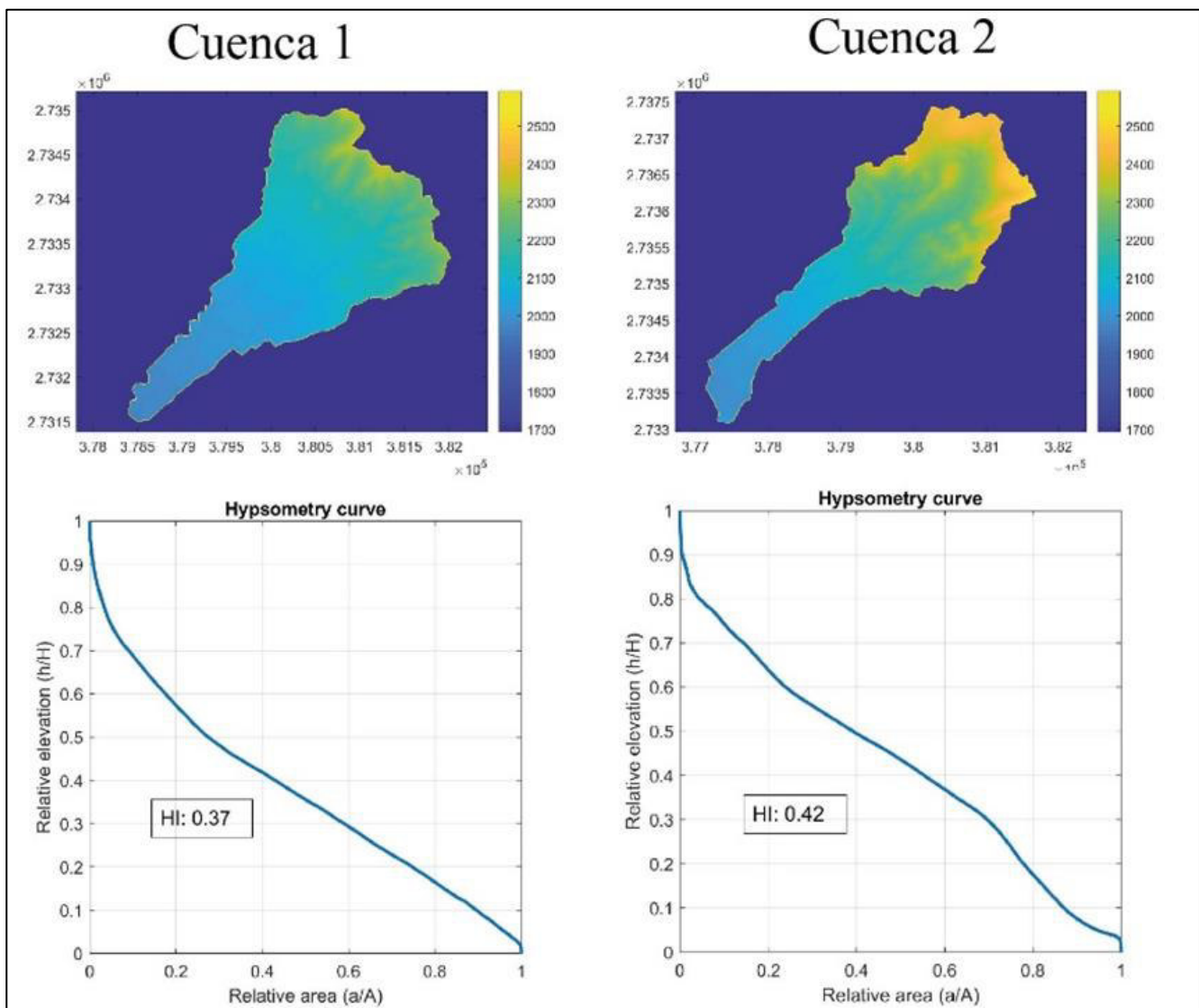


Figura 3: El mosaico de los MDEs tipo LiDAR de 5 metros de resolución fue convertido de formato ráster para ser procesado mediante las funciones propuestas por Jaiswara et al. (2020) para extraer la curva hipsométrica para la caracterización del paisaje.

Como se mencionó anteriormente, la curva hipsométrica es una relación entre el área acumulada y la elevación, ambos fueron normalizados a 1 y graficados en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente (Figura 3). De acuerdo con [Strahler \(1952\)](#) y [Keller & Pinter \(2002\)](#) intervalos de  $0.3 \leq HI \leq 0.6$  son característicos de cuencas con estados de madurez donde la erosión domina en las zonas elevadas y la zona experimenta bajas o lentas tasas de deformación.

El promedio del índice  $SL$  obtenido en 20 puntos para la Cuenca 1 fue de 268 y para la Cuenca 2 de 346. De acuerdo con [Elias et al. \(2019\)](#) el índice  $SL$  se usa para clasificar la actividad

tectónica como: Clase 1 (Alta)  $SL > 500$ , Clase 2 (Moderada)  $300 < SL < 500$ , Clase 3 (Baja)  $SL < 300$ . De acuerdo con esta clasificación la cuenca 1 presenta una actividad tectónica baja; mientras que, la cuenca 2 muestra una actividad tectónica moderada. Por otro lado, cambios abruptos en el gradiente se verán reflejados como picos de amplitud considerable en relación con puntos vecinos (Figura 4), los cuales pueden estar relacionados con cambios litológicos o presencia de fallas. En este caso, estos picos se correlacionan con la ubicación de las trazas de falla propuestas en [Gauna-Sauceda et al. \(2023\)](#).

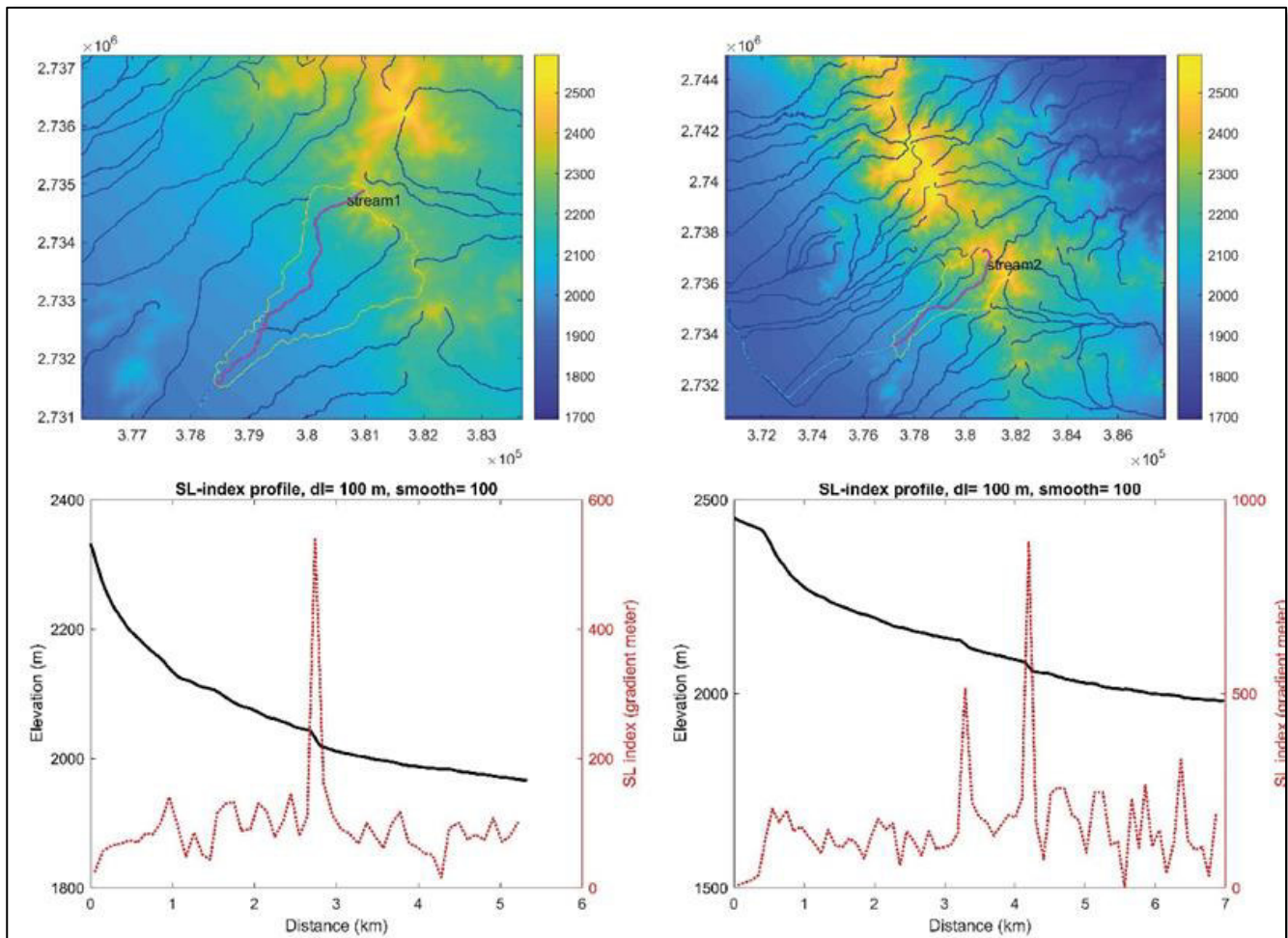


Figura 4: Perfiles longitudinales del índice de gradiente de la corriente para las cuencas 1 y 2. Los picos de mayor amplitud muestran correlación con la localización de fallas activas propuestas en la región.

El cálculo del índice de inclinación normalizado ( $Ksn$ ) para la cuenca 2 muestra una buena correlación con las trazas de falla propuestas, apoyando los resultados obtenidos para el índice  $SL$ .

## Discusión

La forma de la curva hipsométrica es un indicador de la etapa en el ciclo de erosión en el que se encuentra una cuenca

([Strahler, 1952](#); [Ohmori, 1993](#)). En este caso la curva e hipsométrica de las microcuencas analizadas describe un largo periodo erosivo donde se pueden esperar pendientes pronunciadas del canal, lo cual se corroboró con los resultados del índice de gradiente e inclinación normalizado para esta misma microcuenca.

## Conclusiones

Los índices geomorfológicos son herramientas ampliamente utilizados para identificar anomalías geomórficas relacionadas a posible actividad tectónica. En este estudio se calculó la curva e integral hipsométrica, el gradiente de la corriente y el índice de inclinación normalizado para dos microcuencas en el noreste de Santo Domingo, Galeana, NL. Los resultados muestran que la zona presenta valores de *HI* característicos de regiones con bajas

o lentas tasas de deformación. Por otro lado, el gradiente de la corriente y el índice de inclinación normalizado (Figura 4 y 5) muestra una buena correlación con fallas activas propuestas para esta zona. Estos índices muestran que las cuencas analizadas muestran procesos de deformación, sin embargo, es necesario continuar con otros estudios morfométricos y tectónicos para evaluar más detalles sobre los procesos de deformación vigentes en el área de estudio.

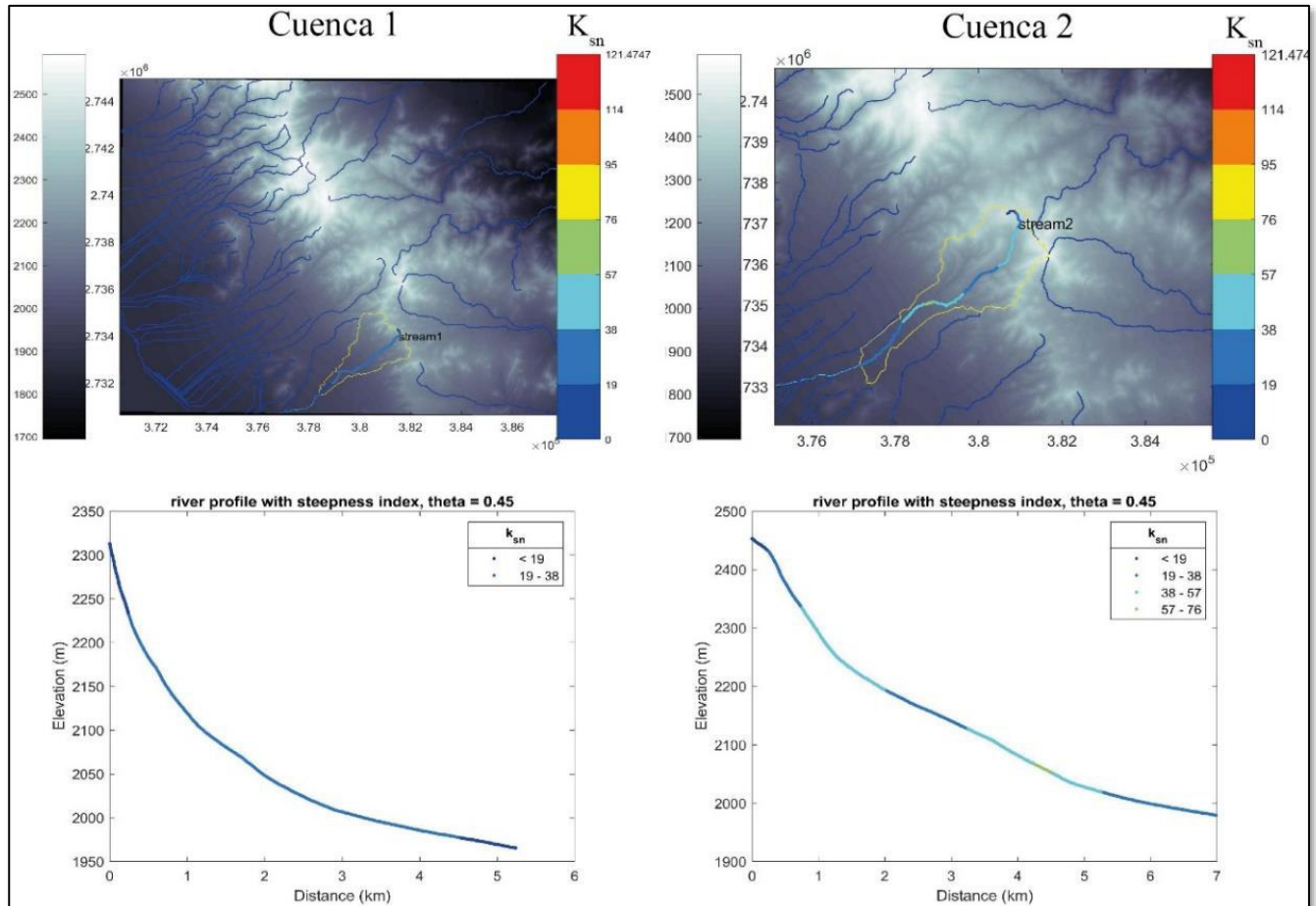


Figura 5: Cálculo del índice de inclinación normalizado para las dos cuencas analizadas y los perfiles correspondientes.

## Bibliografía

Aju, C.D., Achu, A.L., Pranav, P. & Rajesh, R. (2022): Neotectonics assessment using geomorphic indices: A study from the passive continental margin of India. – *Geology, Ecology, and Landscapes*: 1-16.

Burbank, D.W. & Anderson, R.S. (2001): *Tectonic geomorphology*. – 247 p.; (Blackwell Science).

Elias, Z., Sissakian, V. K. & Al-Ansari, N. (2019): Assessment of the tectonic activity in northwestern part of the Zagros Mountains, northeastern Iraq by using geomorphic indices. – *Geotechnical and geological engineering*, **37(5)**: 3995-4007.

Flint, J.J. (1974): Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. – *Water Resources Research*, **10(5)**: 969-973.

- Gauna-Sauceda, I.L., Montalvo-Arrieta, J.C., Salinas-Jasso, J.A. & Ramírez-Fernández, J.A. (2023): The Santo Domingo fault system, Galeana (Nuevo Leon): evidence of neotectonics between the Sierra Madre Oriental and the Basin and Range provinces and hazard implications for northeastern Mexico. – *International Journal of Earth Sciences*, **112**: 1957-1972. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02334-1>
- Jaiswara, N.K., Kotluri, S.K., Pandey, P. & Pandey, A.K. (2020): MATLAB functions for extracting hypsometry, stream-length gradient index, steepness index, chi gradient of channel and swath profiles from digital elevation model (DEM) and other spatial data for landscape characterization. – *Applied Computing and Geosciences*, **7**: 100033.
- Keller, E.A. & Pinter, N. (2002): *Active tectonics: Earthquakes, uplift, and landscape*. – 359 p.; (Prentice Hall).
- Kirby, E. & Whipple, K.X. (2012): Expression of active tectonics in erosional landscapes. – *Journal of Structural Geology*, **44**: 54-75. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009>
- Ohmori, H. (1993): Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. – *Geomorphology*, **8**: 263-277.
- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M. & Azor, A. (2009): CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. – *Computers & Geosciences*, **35(6)**: 1214-1223.
- Schumm, S.A. (1956): Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. – *Geological Society of America Bulletin*, **67**: 597-646.
- Snyder, N., Whipple, K., Tucker, G. & Merritts, D. (2000): Landscape response to tectonic forcing: DEM analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. – *Geological Society of America Bulletin*, **112**: 1250- 1263.
- Strahler, A.N. (1952): Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography. – *Geological Society of America Bulletin*, **63(11)**: 1117-1142.
- Topal, S. & Özkul, M. (2018): Determination of relative tectonic activity of the Honaz Fault (SW Turkey) using Geomorphic Indices [Jeomorfik İndisler Kullanılarak Honaz Fayı'nın (GB Türkiye) Göreceli Tektonik Aktivitesinin Belirlenmesi]. – *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, **24(6)**: 1200-1208. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.18199>
- Wobus, C.W., Crosby, B.T. & Whipple, K.X. (2006). Hanging valleys in fluvial systems: Controls on occurrence and implications for landscape evolution. – *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **111(F2)**.