

Exactitud de la delimitación automática de una cuenca hidrográfica a partir de diferentes fuentes de información

Accuracy of Automatic Watershed Delineation from Various Information Sources

Alejandro Vélez Mesa¹ 

July A. Suárez Gómez² 

Resumen

Las cuencas hidrográficas son espacios delimitados naturalmente, que unen comunidades, y pueden ser manejadas como unidad de estudio fundamental. Para valorar correctamente sus recursos, se debe partir de una buena delimitación del espacio. El objetivo de este estudio es delimitar automáticamente una cuenca hidrográfica ubicada en la región centro-norte de la cordillera central colombiana, para comparar qué tan exacto y preciso es el resultado obtenido, usando, para ello, tres software y cuatro fuentes de información diferentes. Los programas usados fueron: ArcHydro, ArcSWAT y GlobalMapper, y los modelos de elevación (DEM, por sus siglas en inglés): ASTER (30 m), Alos Palsar (12,5 m), y curvas de nivel proporcionadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:10.000 convertidas a modelo de elevación con 5 m de resolución espacial, mediante los métodos de procesamiento TIN to Ráster y Topo to Ráster. Se suele considerar que

Palabras clave:
cuenca hidrográfica, La Unión, modelo de elevación, SIG.

los DEM con mayor resolución llevarán a mejores resultados en la delimitación de las cuencas, pero nuestro estudio demostró algo contrastante. El DEM ASTER, que cuenta con la menor resolución espacial, demostró ser el mejor para trazar la divisoria de aguas de la cuenca, y, además, el más deficiente en la definición del cauce principal. El DEM obtenido a partir de las curvas del IGAC resultó ser eficiente en la delimitación de la cuenca si se procesa con el método Topo to Ráster, y muy deficiente si se hace con TIN to Ráster. Esto demuestra que, más allá la calidad de la fuente de información, es importante tener en cuenta el método de procesamiento y el algoritmo

1 Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. alvelezm@una.edu.co.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0334-3646>.

2 Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. asuarezgom@una.edu.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6848-043X>.

utilizado. Alos Palsar se posicionó como el tercer mejor modelo en la delimitación, pero el mejor en el trazado del cauce principal. Aunque la variabilidad no estuvo tan asociada al software empleado, Global Mapper se mostró como el más eficaz en la delimitación de la cuenca, pero el más deficiente en el trazado del drenaje principal. Por último, ArcSWAT obtuvo el menor desfase en el trazado del drenaje principal. Los resultados obtenidos en este estudio aportan significativamente a la rigurosidad con que se delimitan y estudian las cuencas hidrográficas, y permiten minimizar los errores asociados a la valoración de los recursos.

Cómo citar

Vélez, A. y Suárez, J. (2025). Exactitud de la delimitación automática de una cuenca hidrográfica a partir de diferentes fuentes de información. *Análisis Geográficos*, (58), 82-90.

Abstract

Watersheds are naturally delimited spaces that link communities and can be managed as a fundamental unit of study. To correctly assess its resources, it is necessary to start with a good delimitation of space. The objective of this study is to automatically delimit a watershed located in the north-central region of the Colombian central mountain range, to compare the accuracy of the results obtained, using three different programs and four different sources of information. The programs used were: ArcHydro, ArcSWAT and GlobalMapper, and the elevation models (DEM): ASTER (30 m), Alos Palsar (125 m), and contour lines provided by the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) at 1:10.000 scale converted to elevation model with 5 m spatial resolution, and the processing methods TIN to Raster and Topo to Raster.

Keyword:

watershed, La Unión, digital elevation model, SIG.

It is usually considered that DEMs with higher resolution will lead to better results in watershed delineation, but our study showed something contrasting. As for the DEMs, ASTER, which has the lowest resolution, proved to be the best at delineating the watershed, and the poorest at defining the main channel. The DEM obtained from the IGAC contour lines proved to be efficient in delimiting the watershed if processed with the Topo to Raster method, and very poor if processed with TIN to Raster. This shows that, more than the quality of the information source, it is important to take into account the processing method. Alos Palsar was positioned as the third best model in the delimitation, but the best in the delineation of the main channel. Although there was a low variability associated with the software used, Global Mapper was shown to be the most effective in watershed delineation, but the most deficient in main drainage routing. Finally, ArcSWAT obtained the least mismatch in the main drainage routine. The results obtained in this study contribute significantly to the rigorosity with which watersheds are studied and make it possible to minimize errors associated with resource valuation.

Introducción

Las cuencas hidrográficas son espacios delimitados naturalmente, que unen comunidades, y pueden ser manejadas como unidad de estudio fundamental (Jones et al., 2002). Sus habitantes se ven integrados por el manejo del recurso hídrico, y en muchos casos un uso productivo asociado a este (Molle, 2017). Estas se pueden delimitar de forma manual, tomando como referencias curvas de nivel, o, automáticamente a partir de geoprocesamientos realizados con sistemas de información geográfica (SIG), donde se llevan a cabo cálculos en los píxeles para asignar direcciones y magnitudes a los flujos de agua, con el fin de estimar las características intrínsecas de las cuencas. La exactitud en la delimitación es función de la calidad de la fuente de información y la capacidad del programa para procesarla correctamente (Ray, 2018). Existen diferentes fuentes de información y algoritmos que permiten delimitar cuencas de forma automatizada partiendo de curvas de nivel o modelos de elevación digital (DEM por sus siglas

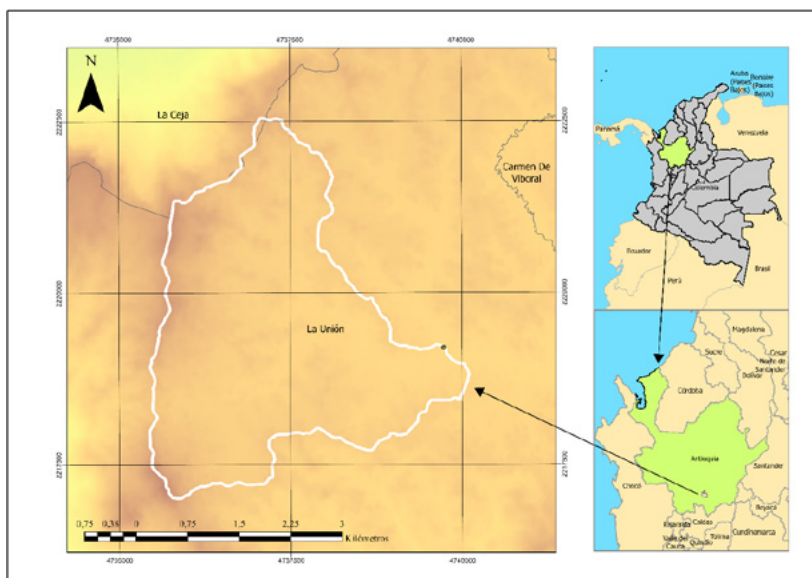
en inglés). Sin embargo, el resultado dependerá de hallar la mejor combinación de acuerdo con las características de los datos y del área de estudio. El objetivo de este trabajo es comparar el error asociado a la delimitación de cuencas con cuatro fuentes de información y tres software diferentes, tomando como referencia una delimitación validada en campo.

Metodología

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la cuenca Río Piedras parte alta, ubicada en el altiplano oriental antioqueño, municipio de La Unión (Figura 1); localizado en la región centro-norte de la cordillera central colombiana., área donde se registra una precipitación media anual mínima de 2.073 mm, máxima de 2.195 mm y una media de 2.129 mm, según los datos históricos de *Worldclim* con una resolución espacial de 1 km² (Fick y Hijmans, 2017). La cuenca suple el requerimiento hídrico del casco urbano, y una parte importante del sector rural del municipio.

Figura 1. Mapa de localización de la cuenca Río Piedras parte alta.



Nota. Elaboración propia a partir de la cartografía básica del IGAC 1:100.000, 2023.

Delimitación de referencia

En un principio, la cuenca se delimitó en ArcGIS Desktop 10.4.1 (ESRI, 2016), tomando como referencia imágenes satelitales, y las curvas de nivel proporcionadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, en escala 1:10.000 (IGAC, 2023). En campo se validó y ajustó la divisoria de aguas de la cuenca, estableciendo una referencia precisa que servirá como línea base para comparar los distintos métodos de análisis.

Fuente de información

Se emplearon DEM provenientes de cuatro fuentes de información ampliamente utilizadas en la delimitación

de cuencas hidrográficas. Los detalles específicos de cada fuente se encuentran detallados en la Tabla 1.

Paquetes de software empleados

La delimitación se realizó con tres softwares o herramientas: (i) ArcGIS Pro 3.1 y su herramienta ArcHydro, que permite analizar variables hidrológicas a partir de un DEM (Maidment, 2002); (ii) la extensión ArcSWAT de ArcGIS Desktop 10.4.1 (ESRI, 2016): es una herramienta que permite analizar el comportamiento hidrológico de una cuenca (Tuppad et al., 2011); (iii) Global Mapper: es un software GIS y geodésico, que permite analizar y procesar información geoespacial (Blue Marbel Geographics, 2023).

Tabla 1. Descripción de las fuentes de información.

Fuente	Resolución o escala	Descripción	Nombre
DEM ALOS PALSAR	12,5 m	Sensor de un satélite japonés, que utiliza tecnología de radar de apertura sintética, proporcionando información de alta calidad sin importar las condiciones meteorológicas del sitio (Rosenqvist et al., 2007).	AP
DEM ASTER	30 m	Sensor del satélite Terra de la NASA, que modela la elevación del terreno (Welch et al., 1998).	ASTER
IGAC	1:10.000 (5 m)	DEM obtenido a partir de las curvas de nivel generadas por el IGAC en escala 1:10.000, por el método de interpolación de Red de Triángulos Irregulares (TIN) y posteriormente convertido a Raster de ArcGIS Pro (ESRI, 2021).	IGAC TIN
IGAC	1:10.000 (5 m)	DEM obtenido a partir de las curvas de nivel reportadas por el IGAC en sus planchas 1:10.000 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2023), por el método de interpolación Topo to Raster.	IGAC TR

Cálculo de la exactitud

La valoración se realizó comparando el área encontrada en cada delimitación con el área de referencia. Para esto se usó el error medio (EM) (Ecuación 1). Donde, A_i es el área del i -ésimo programa o DEM, y A es el área de referencia (Ecuación 1).

$$EM = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} - 1 \right) (1)$$

Exactitud de los drenajes

Al delimitar una cuenca automáticamente, cada software o herramienta traza un estimado de los drenajes, con base en la dirección y acumulación de flujos generados a partir del modelo de elevación. El punto de aforo se ajustó en cada delimitación según la fuente de información, garantizando que su ubicación estimada estuviera lo más cercana posible a

la real dentro de la cuenca delimitada. Para evaluar la desviación, se calculó la distancia promedio entre el drenaje real, obtenido mediante el análisis de una imagen satelital, y el estimado en tres puntos de la parte baja de la cuenca.

Resultados

Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de la cuenca presentó mayor variabilidad entre modelos de elevación que entre software, con una desviación estándar de 8,1 km² y 0,6 km², respectivamente (Tabla 2). Se demostró que el DEM ASTER tuvo el menor error, con un EM promedio de -0,06 %, a pesar de ser el modelo con la resolución espacial más baja (30 m). El segundo error más bajo (-0,75 %) se obtuvo con el DEM obtenido a partir de las curvas de nivel del IGAC con el método de interpolación Topo to Raster (IGAC TR),

contrastando con el obtenido a partir de las mismas curvas, pero con el método TIN to Ráster, que subestimó en promedio 16,77 %, posicionándose como el modelo con el mayor error. El tercer lugar lo obtuvo el DEM Alos Palsar (resolución de 12,5 m), con una subestimación del 1,01 %. Es notable que todas las delimitaciones realizaron subestimaciones del área. También es destacable que, solo la delimitación realizada con el modelo IGAC TIN, subestimó de forma muy significativa en comparación con la referencia. Los demás modelos presentaron un error inferior al 1 %. La Figura 2 muestra que la subestimación en la

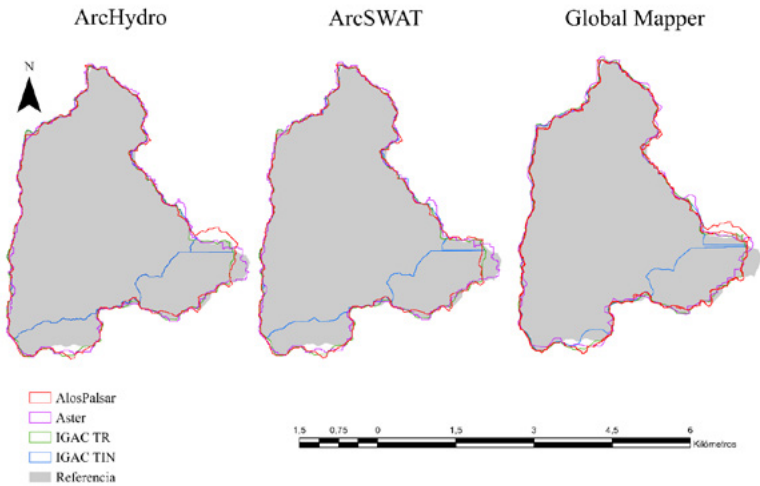
delimitación se concentra principalmente en la parte baja y sur de la cuenca, coincidiendo con áreas de menor pendiente. Esto sugiere una mayor dificultad de los modelos para delimitar en zonas planas con precisión. Por otro lado, la diferencia entre programas se mostró poco significativa, con el menor error para Global Mapper, bajo una subestimación promedio de 4.10 %, seguida de ArcHydro con 4.49 % y ArcSWAT con 5.36 %. Esto demuestra que la exactitud en la delimitación de la cuenca está más influenciada por la fuente de información que por el software utilizado.

Tabla 2. Área resultante de la delimitación de la cuenca Río Piedras Parte Alta, por programa y DEM, con sus errores correspondientes. TR: Topo to Raster; AP: Alos Palsar; EM: Error medio

	Programa						
	ArcHydro		ArcSWAT		Global Mapper		
DEM	Área (km²)	Error (%)	Área (km²)	Error (%)	Área (km²)	Error (%)	EM (%)
IGAC TIN (5 m)	11,50	-17,00	11,18	-19,30	11,91	-14,03	-16,77
IGAC TR (5 m)	13,73	-0,93	13,73	-0,93	13,80	-0,39	-0,75
AP (12,5 m)	13,82	-0,23	13,64	-1,53	13,68	-1,29	-1,01
ASTER (30 m)	13,88	0,20	13,90	0,31	13,76	-0,71	-0,06
EM (%)	-4,49		-5,36		-4,10		

El área de referencia (A) es de 13,85 km².

Figura 2. Comparación entre la delimitación de la cuenca Río Piedras parte alta corregida en campo, y la delimitada automáticamente por tres softwares y cuatro fuentes de información



Generación de drenajes

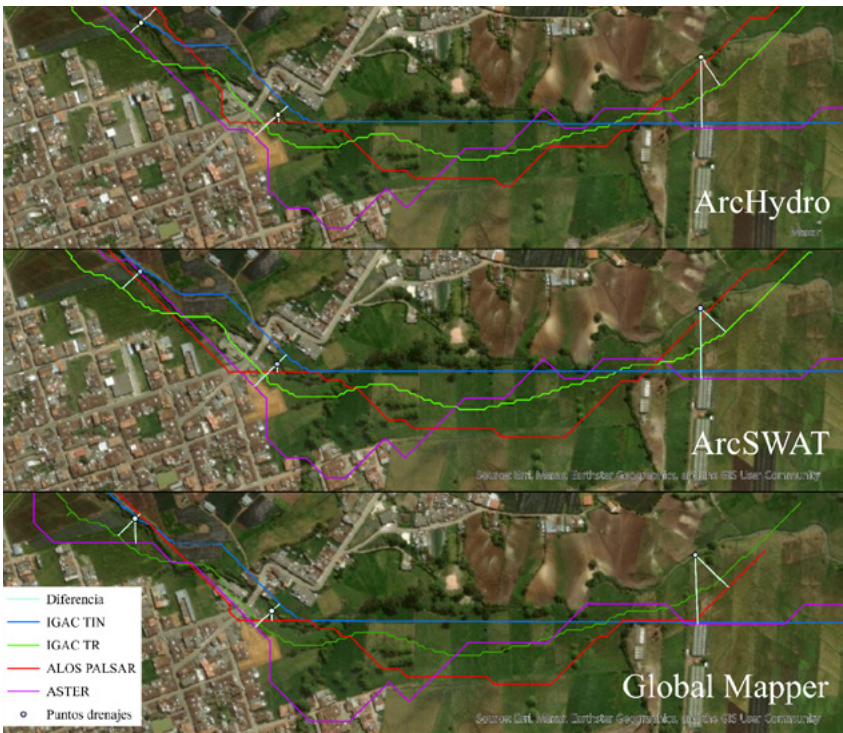
La delimitación de los drenajes estuvo más influenciada por la resolución espacial de la fuente de información que por la delimitación de la cuenca. ASTER presentó la mayor desviación promedio entre los modelos (58,02 m), a pesar de ser el más preciso en el trazado de la divisoria de aguas. Los modelos de elevación generados a partir de las curvas de nivel del IGAC mediante los métodos TIN y Topo to Raster mostraron desviaciones promedio de 41,96 m

y 39,31 m, respectivamente, situándose después de Alos Palsar, que presentó el mejor trazado con una desviación promedio de 20,61 m (Figura 3 y Tabla 3). En cuanto al software ArcSWAT este mostró el menor error (36,35 m), seguido de ArcHydro (40,30 m) y Global Mapper (43,28 m). No obstante, al igual que en la delimitación de la cuenca, las diferencias en la exactitud del trazado entre los software no fueron tan marcadas como las observadas entre las fuentes de información (Figura 3 y Tabla 3).

Tabla 3. Distancia promedio entre el drenaje estimado y el real. TR: Topo to Raster; AP: Alos Palsar

	Programa			Distancia promedio (m)
	ArcHydro	ArcSWAT	Global Mapper	
DEM	Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)	
IGAC TIN (5 m)	43,00	41,34	41,55	41,96
IGAC TR (5 m)	39,17 18,35	39,09	39,66	39,31
AP (125 m)		11,58	31,89	20,61
ASTER (30 m)	60,66	53,37	60,02	58,02
Distancia promedio (m)	40,30	36,35	43,28	

Figura 3. Comparación entre los drenajes estimados por tres programas con cuatro fuentes de información



Nota. Elaboración propia con imágenes Maxar del basemap ArcGIS, Esri, 2024.

Discusión

Generalmente, se asocian mejores resultados con una mayor resolución espacial, pasando por alto la calidad del material utilizado. En este estudio se obtuvo un resultado contrastante e interesante. Con un error medio de -0,06 %, la delimitación de esta cuenca fue más exacta al usar como base el modelo de elevación ASTER, que corresponde al de menor resolución espacial (30 m). Ray (2018) también encontró que, el modelo ASTER, tuvo un menor error que otros modelos de mayor resolución en la delimitación de una cuenca en la India. Por su parte, Shaikh et al. (2023), concluyeron que ASTER es una fuente de información adecuada para la delimitación de cuencas. Cabe destacar que estos autores trabajaron con cuencas miles de veces más grandes, lo que sugiere que los resultados obtenidos no dependen exclusivamente del tamaño de la cuenca.

La segunda delimitación más exacta se obtuvo con las curvas del IGAC llevadas a modelo de elevación con el método Topo to Ráster y una resolución de 5 m, con un error medio de -0,75 %. Este resultado dista significativamente de la delimitación realizada con la misma fuente de información y el procesamiento con la triangulación TIN to Ráster, donde se obtuvo una subestimación promedio del 16,77 %, siendo la fuente de información más inexacta. El error se ubica principalmente en la parte sur y sureste (parte baja) de la cuenca, donde la topografía es más plana, y se suele incrementar el error asociado a la delimitación (Rahman et al., 2010; Al-Muqdadí y Merkel, 2011).

En la parte baja de la cuenca, la delimitación con TIN to Ráster trazó múltiples drenajes paralelos donde no correspondían, haciendo que el área se estrechara formando una especie de embudo, donde realmente existe un valle aluvial. Las dos delimitaciones realizadas con base en las curvas de nivel del IGAC demuestran que, el error asociado a una delimitación, no solo está condicionado por la calidad de la información, sino también por el procesamiento de la información y que puede estar

relacionado además con el relieve y las características propias de cada área de estudio.

En tercer lugar, se ubicó la delimitación realizada con Alos Palsar (12,5 m), con una subestimación de 1,01 %. Las tres delimitaciones más exactas presentaron errores inferiores al 1 %, concentrados principalmente en el procesamiento de la dirección de flujos en las zonas más planas. Por otro lado, la comparación de los diferentes software mostró un mejor desempeño en la delimitación para Global Mapper, con un error medio promedio de -4,10 %, seguido de ArcHydro y ArcSWAT con errores medios de -4,49 % y -5,36 % respectivamente. Esto indica que, aunque hay una diferencia en los resultados, esta es inferior o cercana al 1 %. Por lo tanto, para una delimitación automática precisa de la cuenca, las variaciones en los resultados dependen más de la fuente de información que del software utilizado. Un resultado contrario al de Ray (2018), autor que encontró mayor variación entre software, aunque este empleó ArcGIS Hydrology en lugar de Global Mapper. Por otro lado, nuestros resultados concuerdan con los de Datta et al. (2022), que afirman que las variaciones en la delimitación están más asociadas a la resolución del DEM que al método de procesamiento.

En lo que respecta a la exactitud de los drenajes, Alos Palsar se desempeñó como el modelo más exacto en el trazado del drenaje principal, con un error medio de 20,61 m, seguido del modelo IGAC Topo to Ráster e IGAC TIN to Ráster. Es interesante notar que, a pesar de que el modelo ASTER tuvo el menor error en el trazado de la divisoria de aguas de la cuenca, obtuvo el mayor error en el trazado del drenaje principal, con un error medio de 58,02 m, prácticamente triplicando el error asociado al mejor modelo.

Buakhao y Kangrang (2016) encontraron que, al aumentar la resolución de los modelos, también se incrementa la longitud de los drenajes, lo que sugiere una mayor precisión. Este hallazgo coincide con nuestros resultados, donde la resolución espacial y la exactitud en el trazado del drenaje principal

muestran una relación directamente proporcional. A su vez, Bera et al. (2014) encontraron que, aunque la resolución del DEM no influye de forma altamente significativa en la exactitud, sí lo hace en el trazado de los principales parámetros hidrológicos de una cuenca. Esto demuestra que un modelo no puede considerarse el mejor solo por representar adecuadamente una característica de la cuenca, sino que resulta fundamental definir el propósito de la investigación antes de tomar cualquier decisión.

En este caso, ArcSWAT obtuvo el menor error entre software o herramientas, con una distancia media de 36,35 m, seguido de ArcHydro y Global Mapper, con desfases medios de 40,30 m y 43,28 m respectivamente. El caso es similar a lo encontrado entre fuentes de información, pues, aunque Global Mapper se consideró el mejor programa para delimitar la cuenca, tuvo el peor desempeño en estimar el cauce principal, y esto debe ser tomado en cuenta dependiendo de los intereses particulares del usuario. Por lo tanto, es muy importante tener claro el objetivo del trazado y el nivel de detalle que se espera alcanzar en relación con el tamaño de la cuenca.

Si bien la corroboración en campo sigue siendo fundamental, este estudio presenta herramientas útiles para procesar la información disponible. Es responsabilidad del investigador cuestionar los resultados del sistema, reconociendo que la ausencia de una verificación en campo puede llevar a errores en los datos obtenidos. El estudio determina que, aunque se pueden obtener errores relativamente bajos (0,06 %) en la delimitación de cuencas a nivel municipal, también se podría subestimar en gran medida, y obtener un trazado deficiente de los cauces, incluso con resoluciones altas en el modelo de elevación.

Conclusiones

ASTER demostró ser el mejor modelo de elevación para trazar la divisoria de aguas de la cuenca, pero el más deficiente en la definición del cauce principal. El modelo de elevación obtenido a partir de las curvas

del IGAC demostró ser eficiente en la delimitación de la cuenca si se procesa con el método Topo to Ráster, y muy deficiente si se hace con TIN to Ráster. Alos Palsar se posicionó como el tercer mejor modelo de elevación para la delimitación, pero el mejor en el trazado del cauce principal.

Aunque la variación asociada al software fue mínima, Global Mapper resultó ser el más eficaz en la delimitación de la cuenca, pero el menos preciso en el trazado del drenaje principal. En contraste, ArcSWAT presentó un menor desfase en el trazado del drenaje. Por último, se observó que el error en la delimitación fue mayor en áreas de baja pendiente.

Referencias

- Al-Muqdad, S. W. y Merkel, B. J. (2011). Automated Watershed Evaluation of Flat Terrain. *Journal of Water Resource and Protection*, 03(12), 892-903. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.312099>
- Bera, A. K., Singh, V., Bankar, N., Salunkhe, S. S. y Sharma, J. R. (2014). Watershed Delineation in Flat Terrain of Thar Desert Region in North West India - A Semi Automated Approach Using DEM. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(1), 187-199. <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0308-x>
- Blue Marble Geographics. (2023, May 4). *About Blue Marble Geographics*. <https://www.bluemarblegeo.com/about/>
- Buakhao, W. y Kangrang, A. (2016). DEM Resolution Impact on the Estimation of the Physical Characteristics of Watersheds by Using SWAT. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2016/8180158>
- Datta, S., Karmakar, S., Mezbahuddin, S., Hossain, M. M., Chaudhary, B. S., Hoque, Md. E., Abdullah Al Mamun, M. M. y Baul, T. K. (2022). The Limits of

- Watershed Delineation: Implications of Different DEMs, DEM Resolutions, and Area Threshold Values. *Hydrology Research*, 53(8), 1047-1062. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.126>
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop* (10.4.1). CA: Environmental Systems Research Institute.
- ESRI. (2021). *ArcGIS Pro* (3.1). CA: Environmental Systems Research Institute.
- Esri. (2024). *ArcGIS Pro* (3.3.0).
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc5086>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2023). *Catálogo de objetos: cartografía básica*. https://antiguo.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/igac_cr_cartografiabasi-ca_v2.3_1pdf
- Jones, C., Palmer, R. M., Motkaluk, S. y Walters, M. (2002). *Watershed Health Monitoring*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420010145>
- Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources*. ESRI, Inc.
- Molle, F. (2017). River Basin Management and Development. In *International Encyclopedia of Geography* (pp. 1-12). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0907>
- Rahman, M. M., Arya, D. S. y Goel, N. K. (2010). Limitation of 90 m SRTM DEM in Drainage Network Delineation Using D8 Method-a Case Study in Flat Terrain of Bangladesh. *Applied Geomatics*, 2, 49-58. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0020-2>
- Ray, L. K. (2018). Limitation of Automatic Watershed Delineation Tools in Coastal region. *Annals of GIS*, 24(4), 261-274. <https://doi.org/10.1080/19475683.2018.1526212>
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. y Watanabe, M. (2007). ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3307-3316. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.901027>
- Shaikh, A. A., Pathan, A. I., Waikhom, S. I., Agnihotri, P. G., Islam, Md. N. y Singh, S. K. (2023). Application of Latest HEC-RAS Version 6 for 2D Hydrodynamic Modeling Through GIS Framework: A Case Study from Coastal Urban Floodplain in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 1369-1385. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01567-4>
- Welch, R., Jordan, T., Lang, H. y Murakami, H. (1998). ASTER As A Source for Topographic Data in the Late 1990s. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1282-1289. <https://doi.org/10.1109/36.701078>