

EVALUACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO AMARILLO, ECUADOR

AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE HIDROGRÁFICA RÍO AMARILLO, EQUADOR

Vinicio MACAS ESPINOSA, César BORJA BERNAL, Clelia NARANJO FREIRE

Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Avenida Juan Tanca Marengo y Avenida Raúl Gómez Lince, Guayaquil, Ecuador. E-mails: vinicio.macase@ug.edu.ec; cesar.borjab@ug.edu.ec; clelia.naranjof@ug.edu.ec

Introducción
Área de estudio
Materiales y métodos
Fuentes de datos
Metodología
Resultados
Discusión
Conclusiones
Agradecimientos
Referencias

RESUMEN - El uso de modelos digitales de elevaciones para la delimitación automática de unidades hidrográficas es el método que en la actualidad se aplica para este fin, sin embargo, los resultados que se obtienen sobre un área de estudio varían dependiendo de los datos de partida, así, es necesario investigar cuál es el MDE más apropiado para delimitar y caracterizar una cuenca hidrográfica. El objetivo de la investigación fue realizar la evaluación de cuatro modelos digitales de elevaciones Aster GDEM v3, SRTM, ALOS PALSAR, y SIGTierras, comparando los resultados de cada MDE con puntos de control obtenidos en campo, tomando como métrica de error la distancia euclidiana hacia drenajes y divisorias de agua delimitadas. El MDE que generó menor error fue SIGTierras, a partir del cual se realizó la caracterización de la unidad hidrográfica Río Amarillo, localizada al sur este de Ecuador. Las características de la unidad hidrográfica, indican que es alargada con una alta susceptibilidad a erosión. El relieve es moderado, con zonas montañosas en la parte alta de la cuenca, colinas bajas y pequeñas llanuras de inundación en la parte baja. La elevación más frecuente y la elevación promedio de 1250 m s.n.m coinciden y es una franja altitudinal donde se desarrollan actividades de ganadería, agricultura, y minería metálica. El cauce principal de orden 6, tiene una longitud de 30,54 km y una pendiente promedio alta de 5,64 %, que ante una crecida repentina puede ser una amenaza para la ciudad de Portovelo, sin embargo la pendiente del cauce en sus últimos kilómetros es baja, lo que se relaciona con los coeficientes de compacidad y circularidad obtenidos. Para áreas de estudio similares en rango altitudinal, en caso de no disponer del MDE SIGTierras, se sugiere MDE JAXA.

Palabras Clave: Cuenca hidrográfica. Río Amarillo. DEM. Drenajes. Evaluación de error.

RESUMO - O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para a delimitação automática de unidades hidrográficas é o método aplicado atualmente para este fim. No entanto, os resultados obtidos numa área de estudo variam dependendo dos dados de partida, tornando-se necessário investigar qual é o MDE mais apropriado para delimitar e caracterizar uma bacia hidrográfica. O objetivo da investigação foi realizar a avaliação de quatro Modelos Digitais de Elevação, ASTER GDEM v3, SRTM, ALOS PALSAR e SIGTierras, comparando os resultados de cada MDE com pontos de controle obtidos em campo. A distância euclidiana em relação às drenagens e divisores de água delimitados foi utilizada como métrica de erro. O MDE que gerou o menor erro foi o SIGTierras, a partir do qual se realizou a caracterização da unidade hidrográfica Río Amarillo, localizada no sudeste do Equador. As características da unidade hidrográfica indicam que esta é alongada, com alta suscetibilidade à erosão. O relevo é moderado, com zonas montanhosas na parte alta da bacia, colinas baixas e pequenas planícies de inundação na parte baixa. A elevação mais frequente e a elevação média de 1250 m s.n.m. coincidem, sendo está uma faixa altitudinal onde se desenvolvem atividades de pecuária, agricultura e mineração metálica. O curso principal de ordem 6 tem um comprimento de 30,54 km e uma declividade média alta de 5,64%, o que, perante uma cheia repentina, pode ser uma ameaça para a cidade de Portovelo. Contudo, a declividade do curso nos seus últimos quilômetros é baixa, o que está relacionado com os coeficientes de compacidade e circularidade obtidos. Para áreas de estudo com faixa altitudinal semelhante, caso não esteja disponível o MDE SIGTierras, sugere-se o MDE JAXA.

Palavras-Chave: Bacia hidrográfica. Rio Amarillo. MDE. Drenagens. Avaliação de erro.

INTRODUCCIÓN

Los modelos digitales de elevaciones (MDE) son datos numéricos ráster de alturas del terreno que se emplean en múltiples estudios relacionados con el procesamiento de datos espaciales (Burrough, 1986; Minasny & McBratney, 2016; Singh & Woolhiser, 2002). Inicialmente fueron

generados mediante mapas topográficos sin que los resultados obtenidos sean adecuados para los procesos de investigación (Sindayiheburu et al., 2006).

La evolución de las tecnologías de la información geográfica ha dado lugar a la generación

de MDE mediante tecnologías como RADAR, LiDAR, y fotogrametría, permitiendo delimitar unidades hidrográficas y sus drenajes de forma automática, donde los resultados dependen de la resolución espacial que es el tamaño del pixel del ráster.

De acuerdo con Munoth & Goyal (2019) la resolución espacial de los MDE tiene influencia sobre los parámetros morfométricos al caracterizar una cuenca hidrográfica, además, Buakhao & Kangrang (2016) explican que la selección del MDE de entrada para la simulación de procesos hidrológicos da lugar a resultados distintos dependiendo de la resolución espacial y del tamaño del unidad hidrográfica.

Las cuencas hidrográficas son un espacio territorial que requieren de planificación y gestión (Rodríguez Calderón et al., 2025), y su análisis desde un enfoque geoecológico multidisciplinario es de gran importancia para la priorización basada en geoecología la cual puede brindar oportunidades de conservación mediante la aplicación de índices que permiten priorizar su conservación y manejo (Murphy et al., 2008; Kumar et al., 2021).

Debemos considerar que un MDE al representar la realidad es esencial para determinar divisorias de aguas que permitan delimitar unidades hidrográficas (Kumar et al., 2004), y así poder emplear estos modelos con éxito en la determinación de manejo de ecosistemas de agua dulce (d'Ozouville et al., 2008).

La delimitación de redes de drenajes en amplias zonas de la superficie terrestre pueden ser ejecutadas con el empleo de MDE provenientes de

datos generados con métodos distintos (Murphy et al., 2008; Metz et al., 2011; Drisya & Sathish Kumar, 2016), sin embargo, a pesar de que los MDE basados en LiDAR son más precisos, su alto costo, problemas técnicos y logísticos hacen que los estos modelos sean poco usados por las instituciones, sobre todo en países en vías de desarrollo (Shi et al., 2012).

Los MDE gratuitos se han utilizado para estudios hidrológicos (Przybyła & Pyszny, 2013) delimitando la red de captación y drenaje. La incertidumbre de elevación en los MDE produce influencia en los índices topográficos usados para el estudio estadístico de cuencas hidrográficas (Hebeler & Purves, 2009; Lin et al., 2013). Se comprobó que el MDE de escala intermedia son los más ajustados para definir los límites de las cuencas hidrográficas, con sensibilidad en la determinación de área de acumulación (Gillin et al., 2015).

En la actualidad existen varios sitios web que permiten el acceso gratuito a MDE, sin embargo, estos modelos difieren en su precisión y resolución, considerando también que altas resoluciones conllevan asociados altos tiempos de procesamiento (Fathy et al., 2019) y por ende demandan más recursos tecnológicos a nivel de hardware.

El objetivo de esta investigación es analizar la precisión horizontal de cuatro modelos digitales de elevaciones disponibles de forma gratuita, para establecer cuál es el más apropiado en la delimitación y caracterización de unidades hidrográficas, tomando como zona de estudio específica la unidad hidrográfica Río Amarillo localizada al sur de Ecuador.

ÁREA DE ESTUDIO

El Ecuador continental se encuentra ubicado en la línea ecuatorial y limita al norte con Colombia, al sur con Perú y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 1). El país está dividido en tres regiones geologicamente contrastantes, denominadas Costa, Sierra y Oriente. La Costa está conformada por conglomerado, arcillolitas, calizas entre otras. La Sierra está constituida por lava, piroclasto, andesita y granito; y se caracteriza por su orogenia muy marcada.

El Oriente corresponde a una cuenca sedimentaria de gran potencial petrolero, las litologías predominantes de esta cuenca son arcillas, calizas y areniscas estratificadas. De acuerdo a la UNESCO las Islas Galápagos están consideradas como Patrimonio Natural de la Humanidad y las

lavas basálticas son las rocas que predominan en las Islas (Wolf, 1892).

La Unidad hidrográfica Río Amarillo está ubicada al sur de la región costera de Ecuador, en la parte occidental de la Cordillera de los Andes afloran rocas continental-volcánicas, plutónicas y metamórficas. Estas rocas muestran fallas estructurales de dirección E-O; y relieves montañosos fuertemente marcados por procesos fluviales (Sauer, 1965). El área de estudio tiene 564 m s.n.m y 3906 m.s.n.m. como cotas mínima y máxima respectivamente, siendo el Río Amarillo uno de los tributarios de la cuenca alta del Río Puyango.

El área de estudio comparte su territorio en las provincias meridionales de El Oro y Loja, donde su territorio está emplazado entre los cantones

Zaruma, Portovelo y Saraguro, siendo el cantón Zaruma dominante en extensión.

Zaruma tiene gran importancia desde el punto de vista ambiental, cultural, social y de patrimonio cultural, con actividad extractiva desde la época precolombina, siendo considerada como distrito minero con gran potencial de aprovechamiento geológico y minero (Berrezueta Alvarado et al., 2006; Campoverde et al., 2019),

motivo por el cual el manejo integral de recursos ambientales es de vital importancia para su desarrollo sostenible, objetivo que se puede lograr con un análisis técnico y racional por cuencas hidrográficas, las cuales dan lugar a sistemas territoriales funcionales.

En el área de estudio existen 49 concesiones de minería metálica, que en su mayoría se encuentran en el cantón Zaruma.

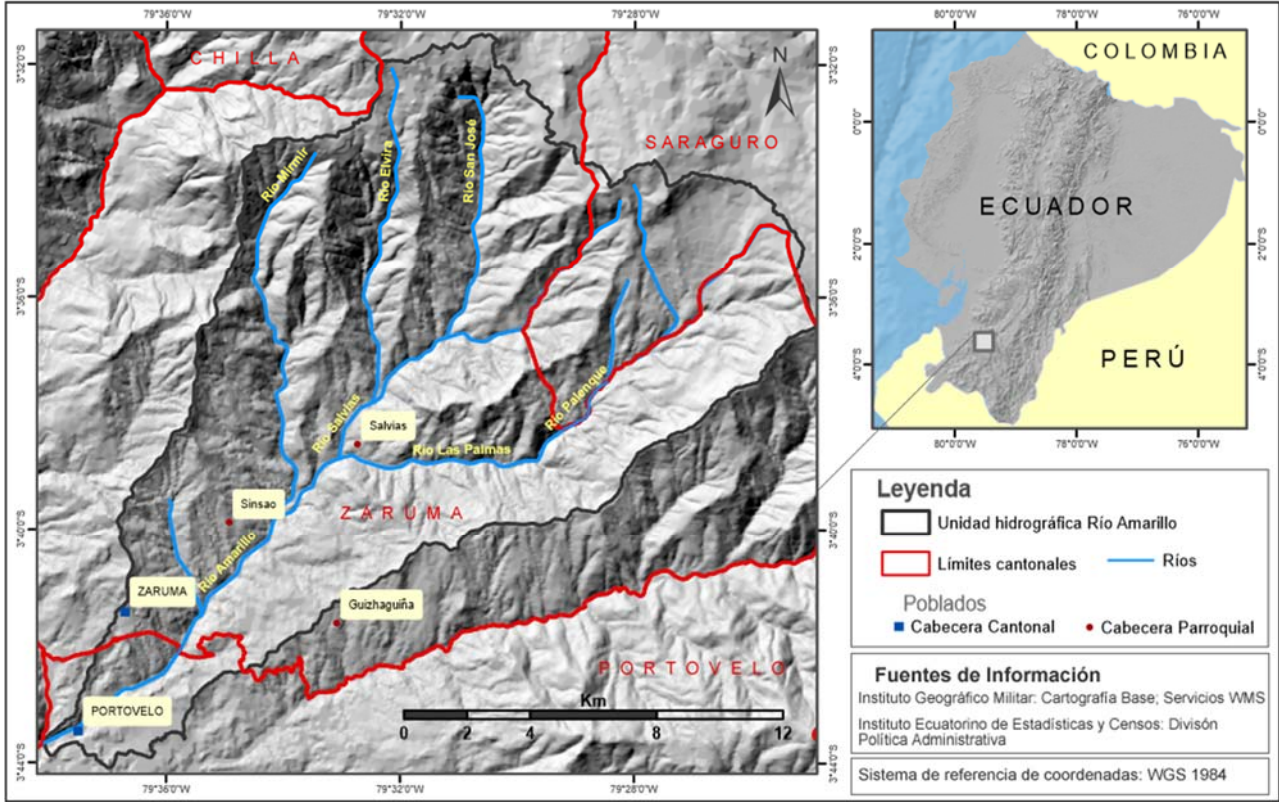


Figura 1 - Mapa de área de estudio: Unidad hidrográfica río Amarillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fuentes de Datos

Se usaron cuatro MDE disponibles en fuentes

de información gratuita, que se muestran en la figura 2, y tienen las características de la tabla 1.

Tabla 1 - Características de los modelos digitales de elevaciones procesados

MDE	Resolución (m)	Elevación Max (m)	Elevación Min (m)	Elevación media (m)
SRTM	30,83	3893	564	2099,68
Aster GDEM V3	30,83	3885	557	2097,39
Alos Palsar	12,5	3910	581	2117,49
SIGTierras	(3) y (5)	3906,44	564,34	2099,44

El MDE Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), fue obtenido desde el geoportal del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) (NASA JPL, 2013). MDE Aster GDEM V3, obtenido del geoportal de la NASA <https://earthdata.nasa.gov/>, ASTER es uno de los cinco sensores que lleva a bordo el satélite TERRA (NASA/METI/AIST/Japan Space Systems And U.S./Japan

ASTER Science Team, 2019).

El MDE Alos Palsar, obtenido del portal (<https://search.asf.alaska.edu>). PALSAR es uno de los sensores a bordo del satélite Advanced Land Observing Satellite-1 (ALOS), de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (ASF DAAC, 2014).

SIGTierras es un MDE generado por el

Ministerio de Agricultura y Ganadería del Gobierno Nacional del Ecuador, y está disponible desde el Centro Geomático Virtual (Ministerio de Agricultura, 2017).

En campo se tomaron un total de 96 puntos de control, así, en 31 puntos se evidenciaron drenajes tales como quebradas o ríos; mientras que los 65 puntos restantes corresponden a la divisoria de aguas, para esto se utilizó un GPS GPSMAP 65s (Kelly & Gontz, 2018; McNally & Souto, 2018;

Strydom et al., 2023) el cual es multibanda y multi GNSS, alcanzado una precisión horizontal de 1.8 m al momento de la toma de datos, esto sin post procesamiento, lo cual garantiza la localización horizontal (X,Y) respecto a la resolución de los MDE en análisis.

La precisión vertical del GPS fue de 10 m, sin embargo, para cuantificar las métricas de error se utilizó la distancia euclidiana que no toma en cuenta la coordenada Z.

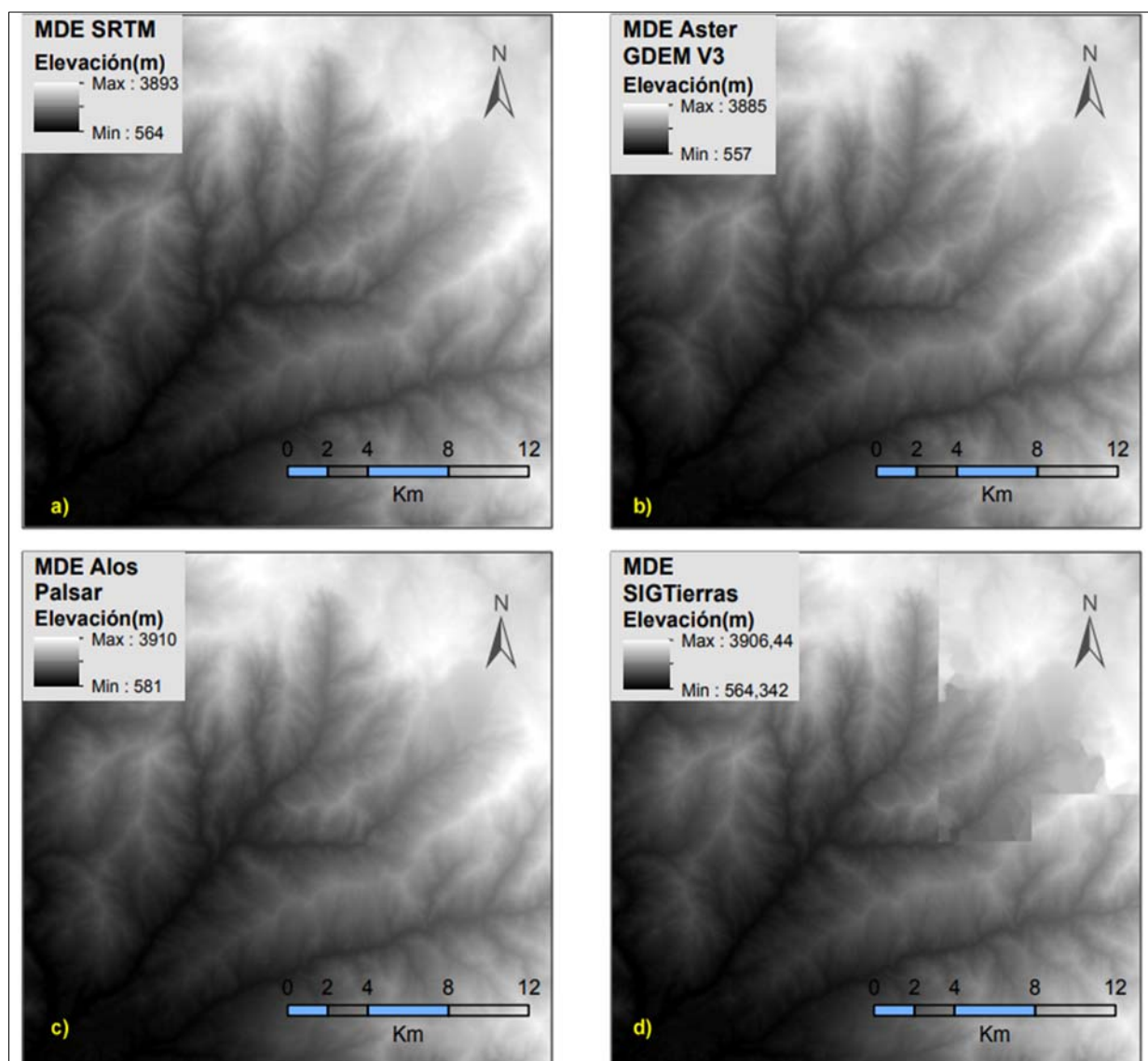


Figura 2 - a) SRTM b) Aster GDEM V3 c) Alos Palsar d) SIGTierras

Metodología

A continuación, se describen los procedimientos realizados para la delimitación de unidades hidrográficas a partir de cada MDE y la cuantificación de errores a partir de los puntos de control para drenajes y puntos de control de divisorias de aguas.

Una vez seleccionado el MDE con menor error en la delimitación, se procede a la caracterización de la unidad hidrográfica Río Amarillo.

Para la delimitación de las unidades hidrográficas se utilizó un modelo elaborado en el software Quantum GIS, versión 3.28.6 (QGIS.org, 2023), (Figura 3), donde las entradas son el MDE y el umbral de acumulación de flujo.

Las variantes en el modelo cartográfico para cada MDE fueron el umbral de acumulación de flujo en número de píxeles y las coordenadas del punto de escorrentía.

Los valores de umbral permitieron generar la

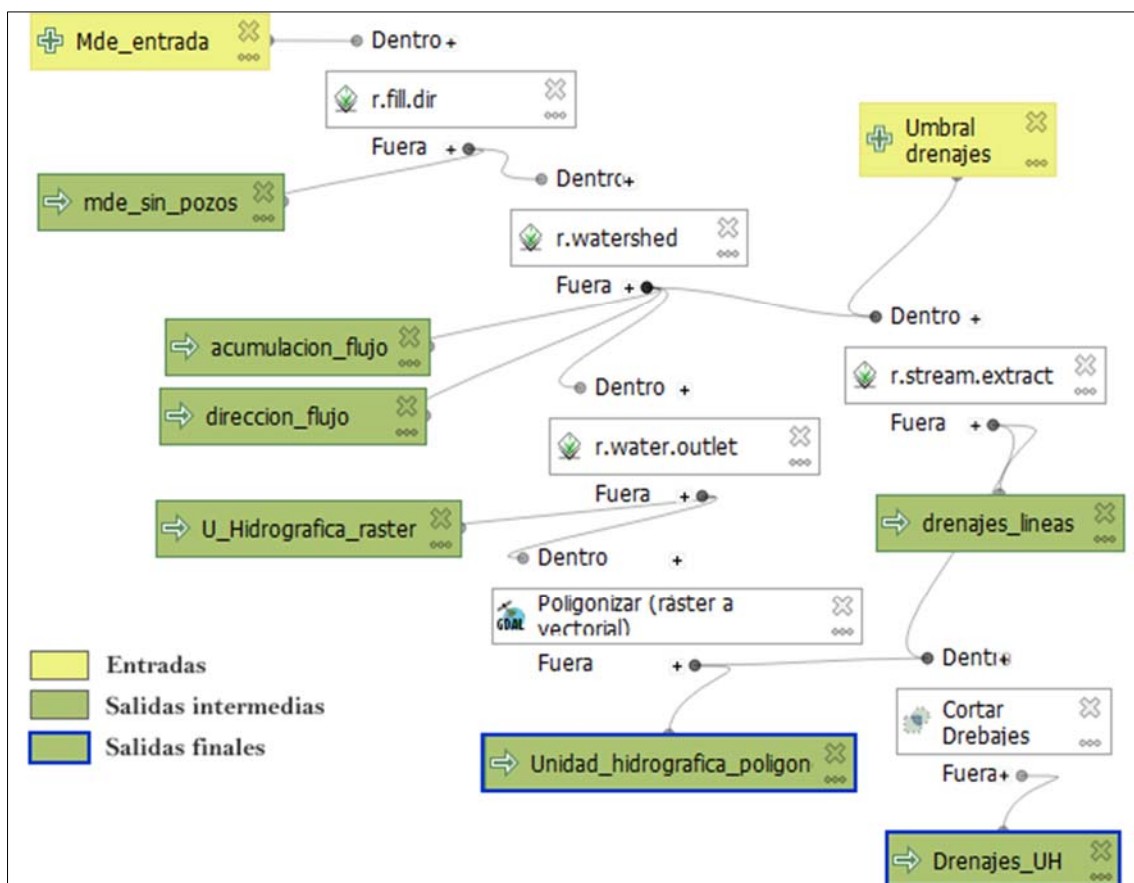


Figura 3 - Modelo cartográfico para la delimitación de las unidades hidrográficas

red de drenajes y fueron establecidos tomando como superficie mínima de captación ocho hectáreas, superficie que permite obtener una red de drenajes similar a la cartografía base 1:5000 del Instituto Geográfico Militar de Ecuador (IGM), así a menor tamaño de pixel, mayor umbral.

Para obtener el valor de umbral para cada MDE, se utilizó la siguiente fórmula:

$$Umbral = \frac{Ac}{Ap}$$

Donde:

Ac: Área de captación que corresponde a 80000 m²
 Ap: R²

R: Resolución espacial del MDE

La figura 4 muestra el proceso para la evaluación de errores para cada MDE.

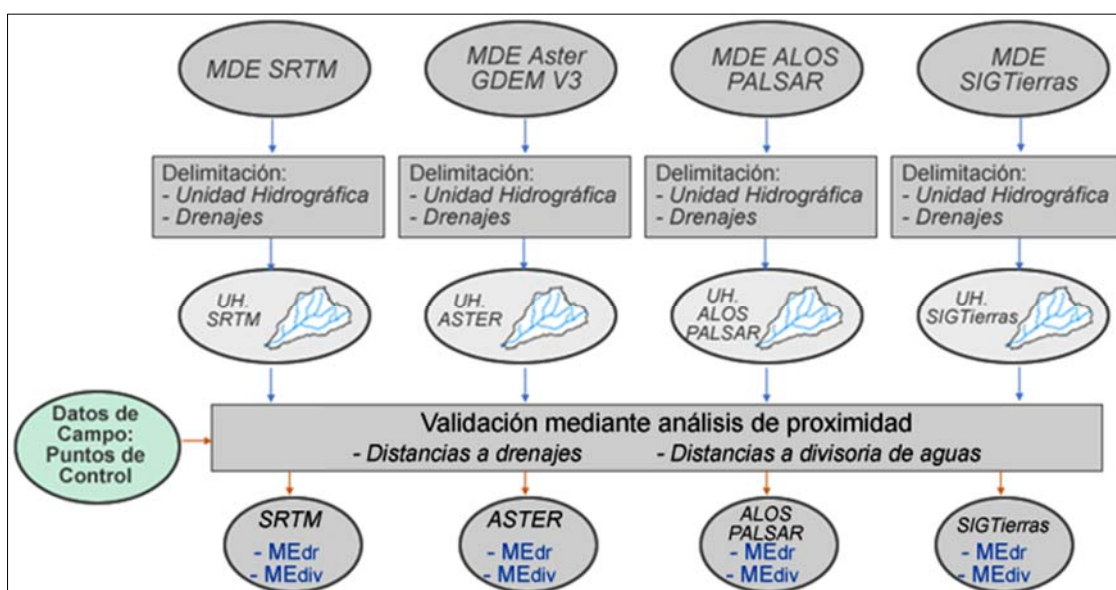


Figura 4 - Modelo para la evaluación de la precisión horizontal de los MDE, mediante el error medio.

Se obtuvo el error residual para cada MDE mediante un análisis de proximidad en el cual se calculó:

La distancia entre los 31 puntos y los drenajes delimitados, y la distancia entre los 65 puntos y la línea divisoria de aguas delimitada.

A partir de los errores residuales obtenidos en el análisis de proximidad, siendo todos valores positivos, se obtuvo dos valores de error medio (ME), uno para las distancias a los puntos de drenaje ME_{dr} , y otro para las distancias a los puntos de la divisoria de aguas ME_{div} , usando la siguiente fórmula:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d$$

Donde:

n : Número de puntos

d : Distancia euclidiana entre cada punto de control y la delimitación realizada en QGIS.

La figura 5 muestra la ubicación de los 96 puntos de control.

Una vez seleccionada la delimitación con menor error, se procedió a caracterizar la unidad hidrográfica Río Amarillo, calculando parámetros morfométricos de la tabla 2.

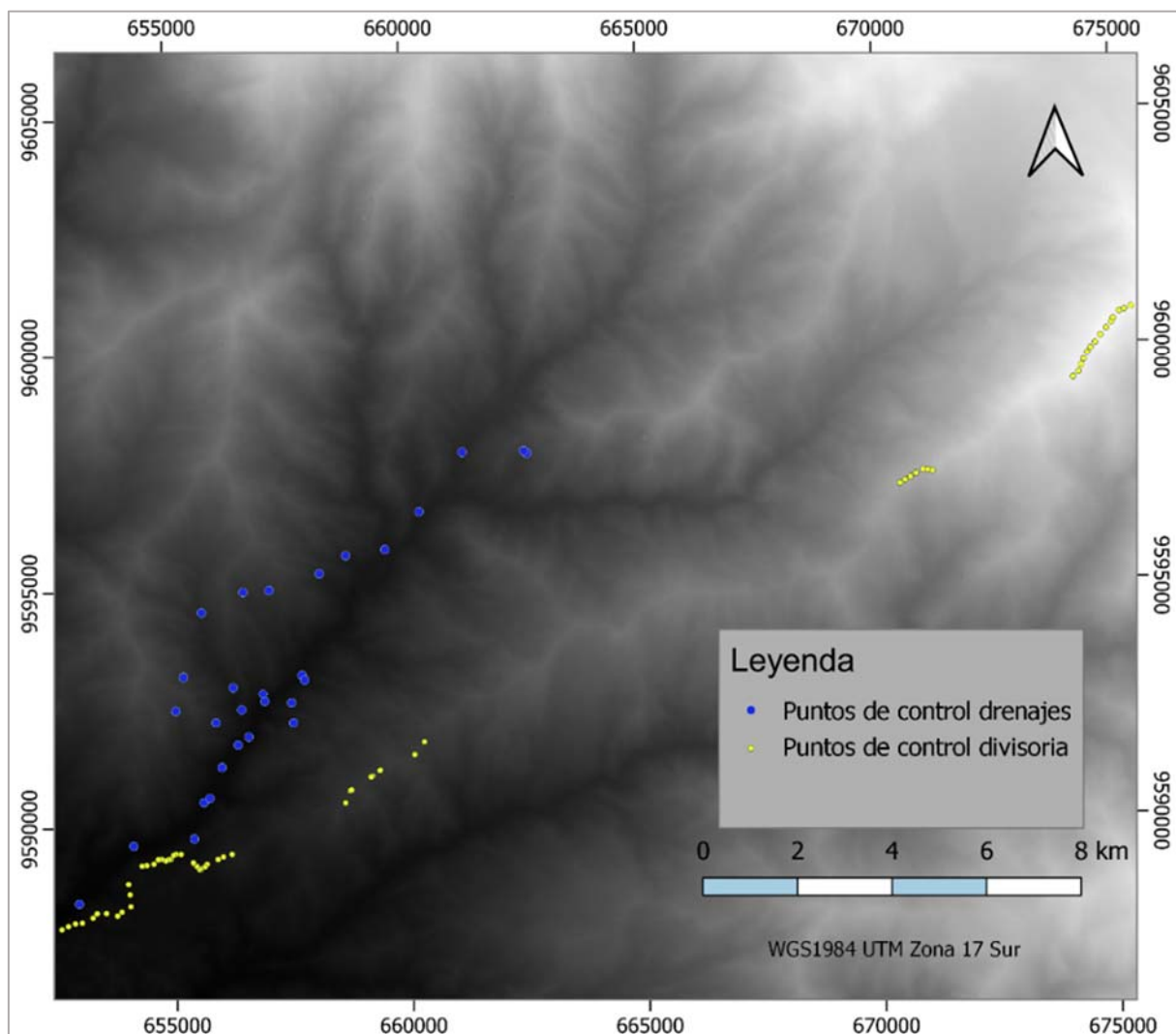


Figura 5 - Ubicación de los puntos de control tomados en campo.

RESULTADOS

La tabla 3 muestra el área, perímetro, y longitud total de drenajes obtenidos por cada MDE. Las figuras 6 y 7, muestran que en la zona baja de la unidad hidrográfica se observan mayores diferencias en la delimitación, en particular, el polígono delimitado a partir del MDE SIGTierras.

La figura 7 muestra la distribución del error en función de la elevación del terreno, donde para ASTER, JAXA y SRTM se muestran errores muy altos en las zonas bajas, mientras que SIGTierras tiene los errores más bajos, sin embargo, este último es el de mayores errores en zonas altas en las que el relieve es más escarpado.

Tabla 2 - Parámetros para la caracterización de la unidad hidrográfica

Tipo de parámetro	Parámetro	Descripción	Fórmula
General	Área (A)	Corresponde a la superficie encerrada por la divisoria de aguas.	Calculado mediante QGIS
	Perímetro (P)	Es la longitud de la línea envolvente de la unidad hidrográfica, a lo largo de la divisoria de aguas.	Calculado mediante QGIS
	Longitud Axial (L)	Es la longitud de la línea recta que conecta los puntos extremos de la cuenca en forma aproximadamente paralela al curso principal (Morisawa & Clayton, 1985).	Calculado mediante QGIS
	Ancho promedio de la cuenca (AP)	Calculada por el cociente entre el área de la unidad hidrográfica y su longitud axial (Cruz Romero et al., 2015).	$AP = A / L$
Basin shape	Factor de forma (Ff)	Se expresa como la relación entre el área de la unidad hidrográfica (A) y su longitud axial (L) elevada al cuadrado (Horton, 1932).	$Ff = A/L^2$
	Relación de Elongación (Re)	Es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La fórmula es la propuesta por (Schumm, 1956).	$Re = (2/L) \times (A/\pi)^{0.5}$
	Coefficiente de Compacidad (Cc)	Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca, y fue calculado con la fórmula de (Gravelius, 1914).	$Cc = P / (2\sqrt{\pi A})$
	Coefficiente de Circularidad (Cci)	Creado por Miller (1953) es un parámetro adimensional importante, donde la longitud y la frecuencia de los cauces, las formaciones geológicas, el uso y cobertura del suelo, son factores que afectan el coeficiente de circularidad (Mazahir et al., 2022).	$Rc = 4\pi A / P^2$
Forma del relieve	Desnivel altitudinal (H)	Es la diferencia de elevación entre la cota máxima de la unidad hidrográfica y la elevación en el punto de escorrentía (Strahler, 1952).	$H = H_{max} - H_{min}$
	Altitud media (Hm)	Es el promedio de la elevación del terreno en la unidad hidrográfica	Calculado en QGIS
	Altitud más frecuente de la cuenca (Hmf)	Corresponde a la altitud del terreno con mayor superficie en la unidad hidrográfica	Calculado en QGIS
	Altitud mayor cauce principal (HmaxCp)	Es la elevación del terreno en el punto donde inicia el cauce principal	Calculado en QGIS
	Altitud menor cauce principal (HminCp)	Es la elevación en el punto de escorrentía	Calculado en QGIS
	Pendiente media de la cuenca (Pm)	Calculada en porcentaje a partir del modelo digital de elevaciones utilizando el sistema de información geográfica.	Calculado en QGIS
	Curva hipsométrica (Ch)	Permite conocer la variación de la superficie respecto a la elevación del terreno, y se realiza mediante un gráfico de la elevación en función de la superficie acumulada en porcentaje (Ibañez Asensio et al., 2011).	Calculado en QGIS
	Histograma de frecuencias altimétricas	Representa la superficie (ordenadas) existente en rangos de cotas (abscisas) con intervalos iguales (Ibañez Asensio et al., 2011).	Calculado en QGIS
Red de drenajes	Orden de la cuenca (N)	Es el mismo orden del cauce principal (Strahler, 1952).	Calculado en QGIS
	Longitud de todos los cauces (Ltc)	Es la sumatoria de la longitud de todos los drenajes existentes dentro de la unidad hidrográfica (Horton, 1945).	Calculado en QGIS
	Longitud del cauce principal (Lcp)	Es la longitud del drenaje con mayor orden, el cual finaliza en el punto de escorrentía.	Calculado en QGIS
	Densidad de drenajes (Dd)	La densidad de drenaje permite establecer de forma cuantitativa si la unidad hidrográfica tiene un buen drenaje (Horton, 1945), así a mayor densidad de drenaje, mayor capacidad de escurrimiento.	$Ddr = Ltc/A$
	Número de drenajes de orden 1 (N1)	Corresponden a los cauces que no tienen tributarios (Strahler, 1952).	Calculado en QGIS
	Coefficiente de torrencialidad (Ct)	Es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca. Debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempo de llegada al pico y alta torrencialidad (Camino et al., 2018).	$Ct = nro \text{ cauces} / A$
	Pendiente cauce principal (Pcp)	Es un indicador que permite evaluar el volumen de escorrentía, y se calcula mediante el cociente entre el desnivel que existe entre el inicio y fin del cauce principal, y la longitud del cauce principal (Sreedevi et al., 2009).	$PcP = (H_{maxCP} - H_{minCP}) / Lcp$
	Tiempo de concentración (Tc)	Es el tiempo que tarda el flujo desde el punto más alejado de la cuenca, hasta llegar al punto de escorrentía (Chow et al., 1994). En este caso se aplicó la fórmula California Culverts Practice (1942).	$Tc = (0,87 * L^3 / H)^{0,385}$

Tabla 3 - Parámetros de entrada para modelo cartográfico y resultados obtenidos de área y longitud total de los drenajes por cada MDE

MDE	Punto escorrentía	Superficie (km ²)	Perímetro (km)	Umbral utilizado (píxeles)	Longitud total de drenajes (km)
SRTM	X:651663,76 Y:9587806,76	257,99	109,17	85	785,65
ASTER GDEM V3	X: 651655,57 Y: 9587865,05	258,17	110,83	85	818,95
JAXA	X: 651654,38 Y: 9587806,87	258,53	111,53	512	753,76
SigTierras	X:651655,8 Y:9587806,14	256,71	115,88	8889	682,61

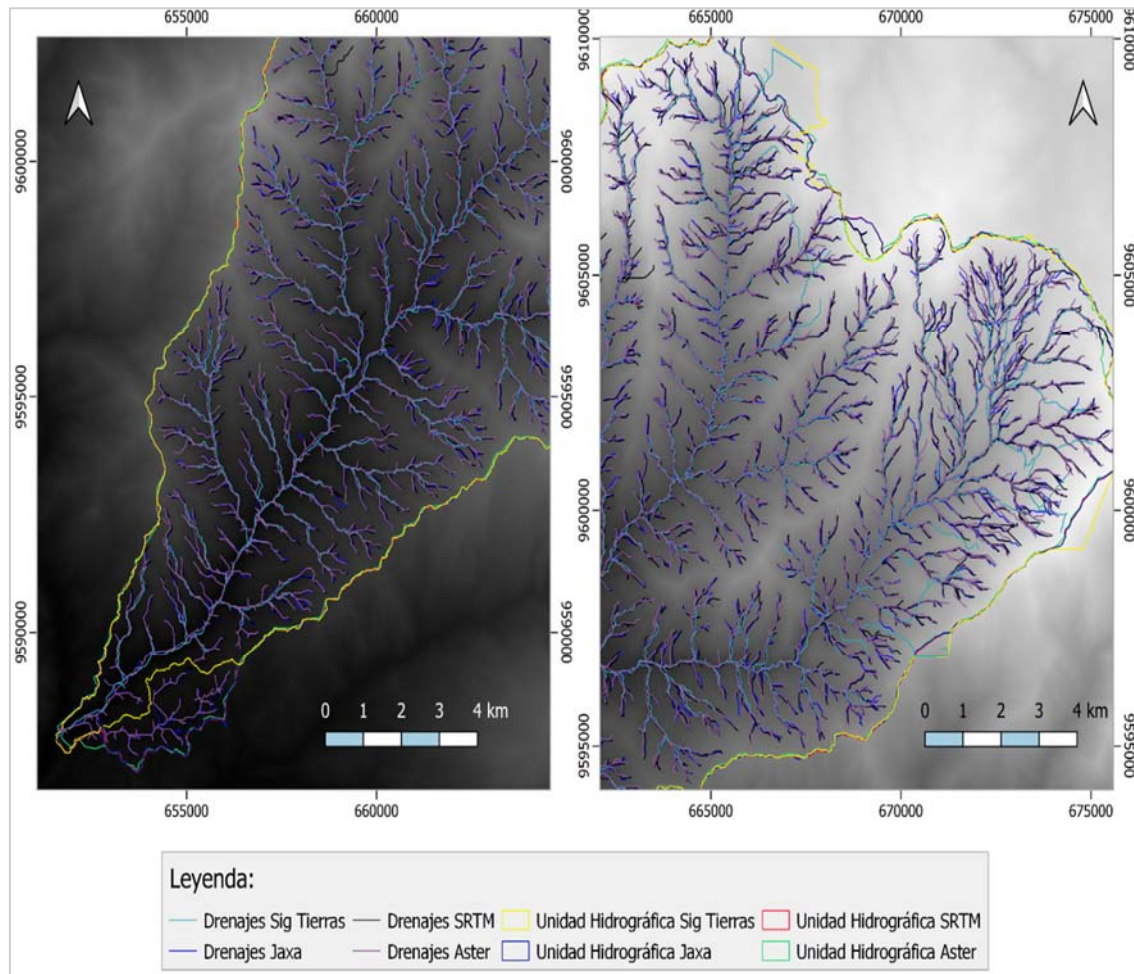


Figura 6 - Unidades hidrográficas y drenajes delimitados por cada MDE; Izq: Zona media y baja de la unidad hidrográfica. Der: Zona alta de la unidad hidrográfica Río Amarillo.

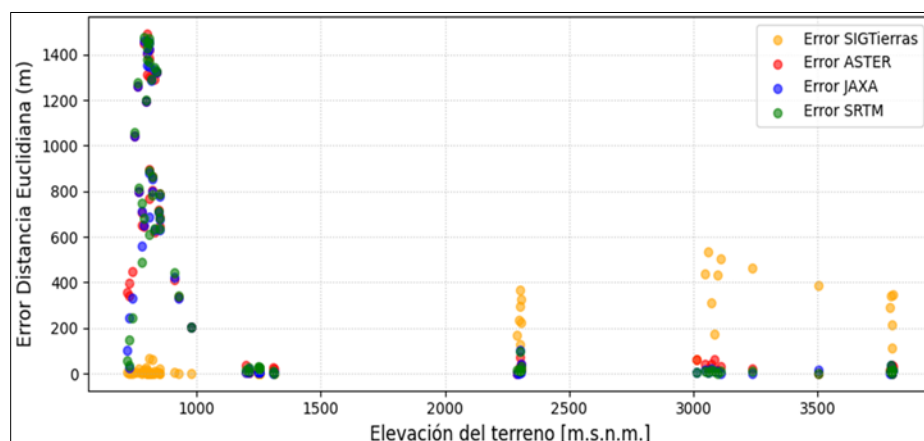


Figura 7 - Error de en función de la elevación del terreno

Las tablas 4 y 5 muestran el error medio obtenido para los drenajes delimitados y las divisorias de unidades hidrográficas respectivamente, siendo el MDE SIGTierras el que tiene menor error con un valor máximo de 16,46 m respecto a los drenajes y 536,28 m en relación a la divisoria de unidad hidrográfica.

De acuerdo a los resultados que se muestran en las tablas 4 y 5, se establece que, el MDE con menor error tanto para la distancia a drenajes como para la distancia a la divisoria de aguas, es el MDE SigTierras, y como resultado de la caracterización de la unidad hidrográfica del Río Amarillo, a partir de este MDE se obtuvo la tabla 6 y la figura 8.

Tabla 4 - Error medio entre drenajes delimitados y puntos de control, por cada MDE

MDE	Error medio (m)	Error máximo (m)	Error mínimo (m)
SRTM	17,47	50	0,1
ASTER	23,3	113,32	0,7
JAXA	17,06	49,44	0,19
SigTierras	4,54	16,46	0,08

Tabla 5 - Error medio entre divisorias delimitadas y puntos de control, por cada MDE

MDE	Error medio (m)	Error máximo (m)	Error mínimo (m)
SRTM	444,30	1474,72	1
ASTER	461,57	1491,63	0
JAXA	442,35	1458,85	0
SigTierras	102,86	536,28	0

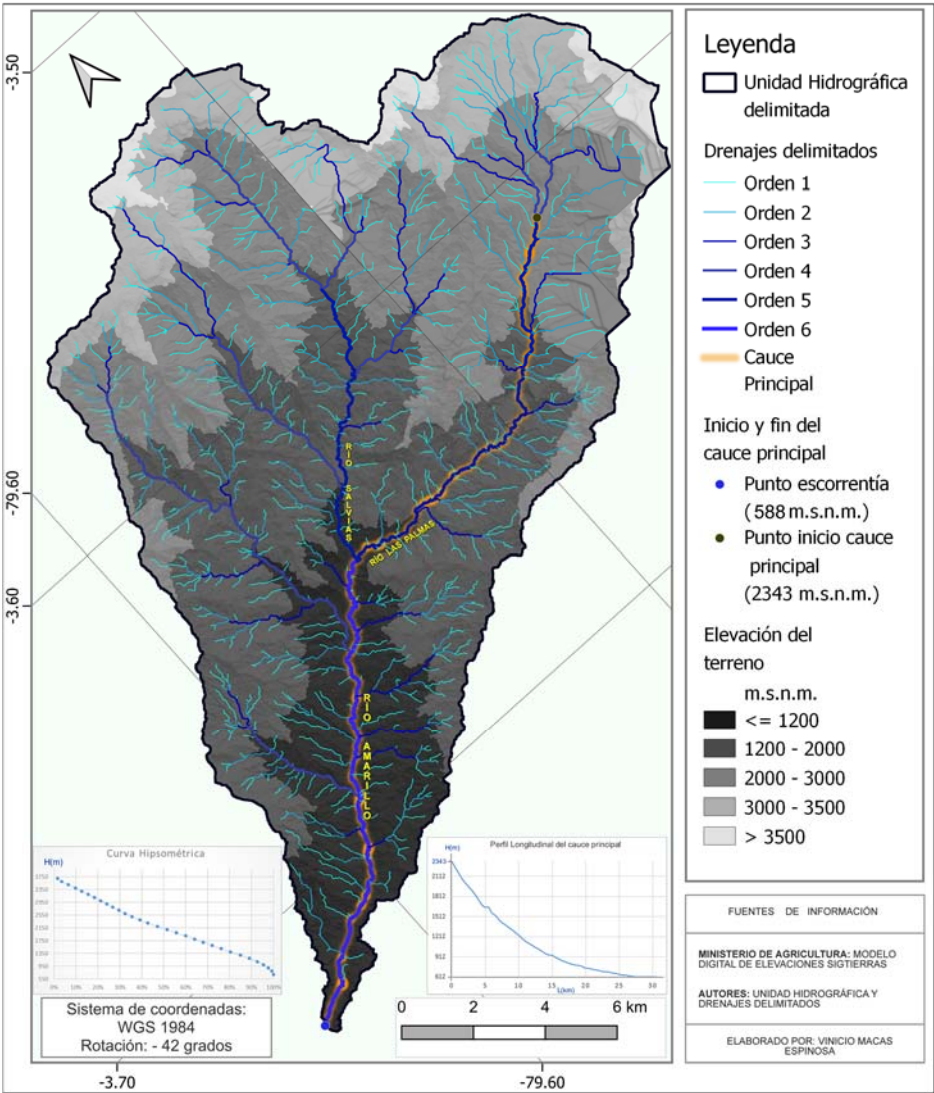


Figura 8 - Mapa resultante de la caracterización de la unidad hidrográfica Río Amarillo.

Tabla 6 - Parámetros de caracterización de la U.H. Río Amarillo, a partir del MDE SIGTierras

	Valor	Descripción
A	256,71 km ²	Es la superficie de acumulación de flujo aportante al punto de escorrentía, que de acuerdo al NIH Roorkee (1998) se trata de una unidad hidrográfica de tamaño intermedio.
P	115,88 km	Es la longitud de la divisoria de aguas que en este caso limita con las cuencas hidrográficas de los ríos: Jubones, Calera, y Luis
L	27,74 km	Es la longitud de la línea paralela al cauce del río Amarillo hasta llegar a la divisoria de aguas en el punto más alejado.
AP	9,25 km	Se considera una moderadamente estrecha, con una respuesta hidrológica rápida, pero no extrema, relacionado con el factor de forma.
Ff	0,33	Es una cuenca ligeramente alargada, la cual presenta un flujo superficial no abrupto y de mayor duración, lo cual permite una mejor gestión durante un evento de altas precipitaciones (Doad et al., 2012)
Re	0,65	Es alargada de relieve irregular y altas pendientes, lo cual la hace altamente susceptible a la erosión (Sukristiyanti et al., 2018).
Cc	2,04	Indica que es de clase III, con forma oval lo cual indica una menor tendencia a tener fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento (Consorcio POMCA Quindío, 2018)
Cci	0,24	Ratifica que se trata de una cuenca alargada, lo cual es una característica que no intensifica la crecida del río (Ibisate, 2004).
H	3272,69 m	Que corresponde a un valor alto, ya que Río Amarillo, es un tributario en la parte alta de la cuenca del Río Puyango.
Hm	2082,96 m.s.n.m.	Altitud en la que el relieve es irregular, y se aproxima al inicio del cauce principal.
Hmf	1250 m.s.n.m.	En la cual se tiene presencia de actividades antrópicas como agricultura y ganadería, y además se originan varios de los cauces de orden 3
HminCp	612 m.s.n.m.	En el punto de escorrentía ubicado en el Puente Negro, en la cercanía de la ciudad de Portovelo.
HmaxCp	2343 m.s.n.m.	Altitud en la que inicia el río Palenque, que más abajo toma el nombre de río Las Palmas, ambos de orden 5.
Pm	47,85%	Obedece al terreno en su mayoría irregular, alcanzando en las zonas altas, hasta el 200% y en la parte baja en las riberas del río pendientes de 0%.
Ch	Río maduro	Como se muestra en la figura 7, el relieve de la unidad hidrográfica corresponde a la de un río maduro.
Hfa	1250 m.s.n.m.	De acuerdo al histograma de frecuencias altimétricas (Figura 9) abarca una superficie de 11,94 km ² .
N	6	Es el orden del cauce del río Amarillo, el cual tiene como principales tributarios al río Las Palmas y el río Salvias, ambos de orden 5.
Ltc	682,61 km	Es la longitud total de todos los cauces.
Lcp	30,54 km	El río Amarillo tiene como sus principales afluentes a los ríos Salvias y Las Palmas, así, fue considerado para generar el cauce principal.
Dd	2,66 km/km ²	Se considera como moderada, y expresa un relieve moderado, dando lugar a una red hidrográfica desarrollada pero razonablemente distribuida (Aldharab et al., 2019).
N1	761	Es el número de cauces de orden 1.
Ct	2,96 cauces/km ²	A partir de los cauces de orden 1, se considera como un potencial erosivo moderadamente alto (Camino et al., 2018).
Pcp	5,64 %	En promedio es un cauce de alta pendiente (Rosgen et al., 2013). La figura 7 muestra el perfil del cauce principal, donde las pendientes más fuertes se encuentran al inicio del cauce, y se suavizan alcanzado el valor de 2.5 % de promedio en los últimos 14 km hasta llegar al punto de escorrentía
Tc	2,18 horas	Igual a 2 horas y 11 minutos, en un escenario de una lluvia de intensidad constante, es el tiempo en el que toda la cuenca inicia la contribución de flujo hacia el punto de escorrentía (Chow et al., 1994).

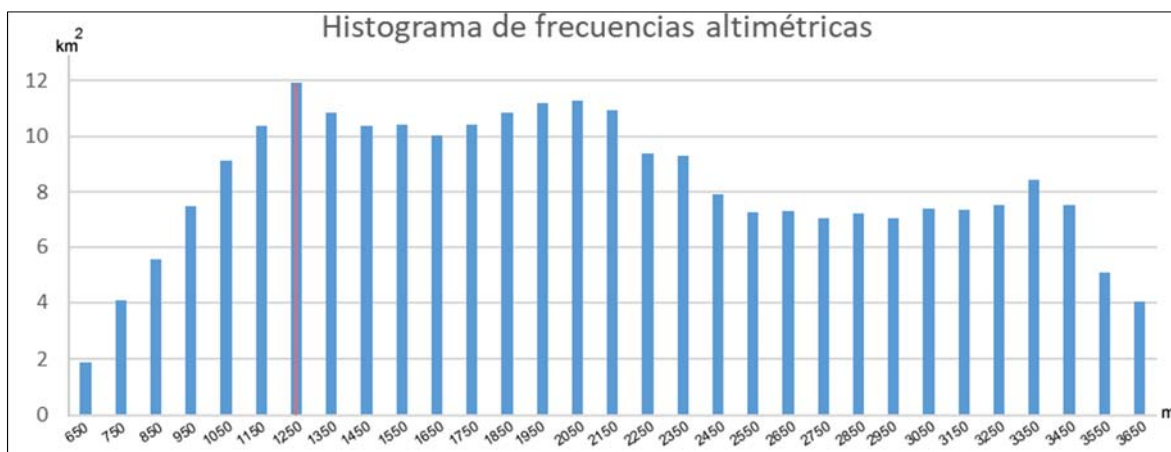


Figura 9 - Histograma de frecuencias altimétricas

DISCUSIÓN

La figura 6 muestra la delimitación de las divisorias de aguas y drenajes similares, así como indican Drisya & Sathish Kumar (2016) en el estudio realizado en el sur de la India, que utilizaron tres MDE en dos cuencas hidrográficas, sin embargo, la diferencia principal que hace al MDE SigTierras mejor en esta investigación es la zona cercana al punto de escorrentía, al margen de la vía Portovelo - Salati, donde en los últimos años se ha realizado la construcción de relaveras tanto públicas como privadas.

Además, el estudio realizado en India coincide con la afirmación de que a mejor resolución espacial del MDE, menor error en la delimitación de drenajes y divisoria de aguas.

En otro estudio en la Península de Sinaí Fathy et al. (2019) compararon tres MDE para el mismo propósito y concluyeron que una mayor resolución espacial trae consigo un menor error en la delimitación de los elementos de la unidad hidrográfica, pero en contraste a esta investigación, no se utilizó datos de campo, sino la comparación visual de los resultados obtenidos, con imágenes de satélite.

En el estudio de Moges et al. (2023) analizaron seis MDE para la delimitación de unidades hidrográficas y de forma similar a esta metodología evalúa el error en la delimitación, utilizando la distancia a puntos de control y también obtiene menores errores con los MDE de mejor resolución espacial.

La evaluación de los MDE en otras investigaciones, se realizan comparando la simulación de inundaciones (Nazari-Sharabian et al., 2020), la evaluación de métodos de fusión de datos (Huang et al., 2023), o la precisión vertical (Aziz & Rashwan, 2022), lo cual para datos de alta resolución puede involucrar altos tiempos de procesamiento, esto en contraste a la delimitación de unidades hidrográficas y sus drenajes donde el paso que mayor tiempo requiere es calcular la acumulación de flujo.

La subcuenca Río Amarillo es de mayor o igual tamaño que varias cuencas hidrográficas de Ecuador que aportan a la vertiente del Pacífico, como los ríos Tenguel, Jipijapa y Mate, ubicados en la región Costa con bajos desniveles altitudinales.

Si bien el MDE SigTierras proporciona excelentes resultados para el área de estudio, que inicia a los 588 m.s.n.m, es importante evaluar su precisión a elevaciones más bajas, esto tomando en cuenta que en general la delimitación de los drenajes a partir de MDE no es buena en zonas de baja elevación, al respecto se ha visto que el MDE SigTierras, se comporta como un Modelo Digital de Superficie (MDS) en zonas bajas.

La figura 10 se muestra dentro de una zona donde la elevación real varía entre los 20 y 25 m.s.n.m.

No obstante, el MDE hace parecer que la elevación máxima llega a los 45 m.s.n.m., esto debido a una parcela de palma africana.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la metodología aplicada los MDE con mejores resultados son SIGTierras con un error medio para la divisoria de aguas es 102,86 m y 4,54 m para los drenajes; y en segundo lugar el MDE JAXA, con un error

medio para la divisoria de aguas de 442,35 m y para los drenajes 17,06 m.

Las mayores diferencias entre las delimitaciones se encuentran en zonas bajas donde las actividades antrópicas realizadas por la minería

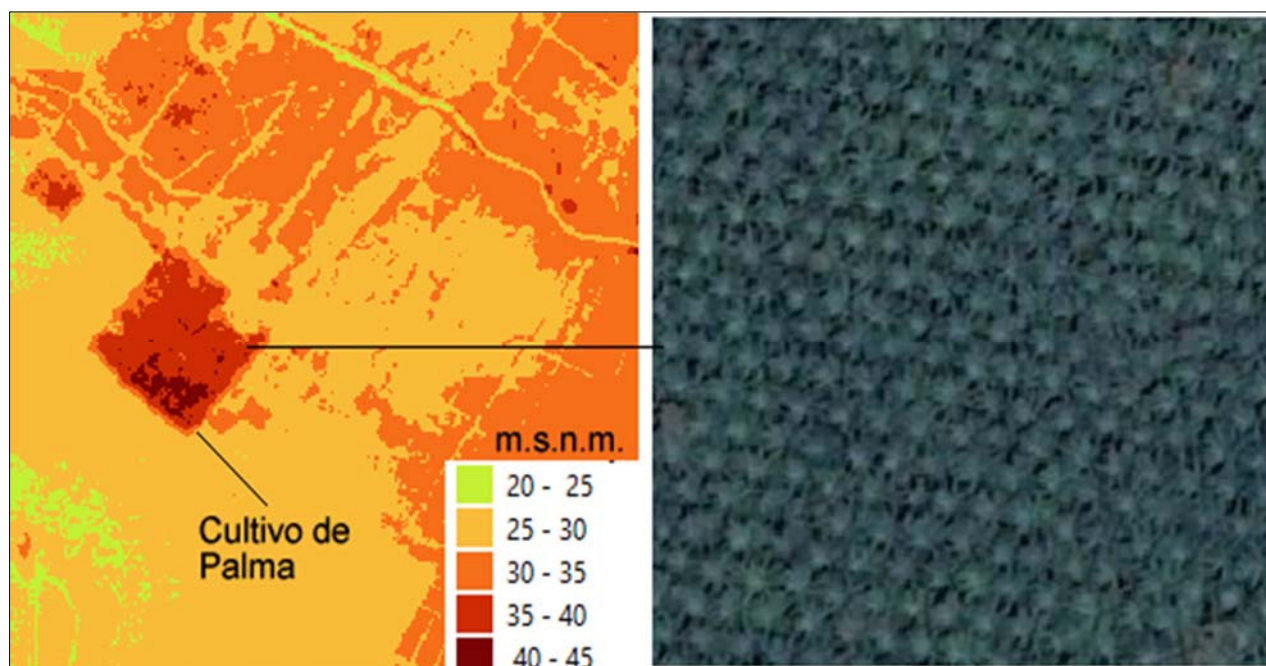


Figura 8 - MDE SigTierras, Izq: MDE SigTierras Der: Cultivo de Palma Africana

metálica se han expandido. En el contexto del área de estudio para el MDE SIGTierras los errores mayores a 100 m corresponden a los puntos de control de la divisoria de aguas en elevaciones superiores a los 2000 m.s.n.m esto debido a relieves escarpados, y a su vez concentra los menores errores en la cercarías del punto de escorrentía, por lo que a mayor elevación mayor error.

La unidad hidrográfica del Río Amarillo con una superficie de 256,71 km², se clasifica como de tamaño intermedio y es una subcuenca de la cuenca transfronteriza del Río Puyango. Al ser exorreica, contribuye a la vertiente del Pacífico, desembocando en costas peruanas. Los parámetros de forma permiten establecer que se trata de una unidad hidrográfica alargada lo cual permite tener un tiempo de respuesta adecuado para tomar medidas necesarias ante posibles eventos extremos de precipitación en las zonas altas.

Sin embargo, la *Re* indica una alta susceptibilidad a erosión, por lo que es importante el mantenimiento periódico de los cauces, así como estudios futuros que permitan zonificar y priorizar medidas de conservación. El relieve es moderado, con zonas montañosas en la parte alta de la cuenca, colinas bajas y pequeñas llanuras de inundación en la parte baja.

Tiene un desnivel altitudinal de 3272,69 m, medidos desde el punto de escorrentía ubicado en el puente Negro, a una elevación de 588 m.s.n.m., después de que su cauce principal atraviesa por la ciudad de Portovelo.

La cota máxima de la cuenca es 3681 m.s.n.m, esto al sur este del cantón Zaruma, en las cercanías de la laguna de Chinchilla, y la localidad a mayor elevación en la cuenca es el barrio Sabadel de la parroquia Manú en el cantón Saraguro en las cercanías del Cerro de Arcos.

La elevación más frecuente y la elevación promedio de 1250 m.s.n.m coinciden y es una franja altitudinal donde se desarrollan actividades de ganadería, agricultura, y minería metálica, y además se encuentran la ciudad de Zaruma, y otros poblados como Sinsao, Salvias y Guizhaguña.

Las pendientes de la cuenca son variables desde escarpadas en zonas altas, hasta planas en la ciudad de Portovelo, que en promedio alcanza 47,85%. La curva hipsométrica indica que es un río maduro e implica potencialidad para la erosión del suelo.

El cauce principal de orden 6, tiene una longitud de 30,54 km y una pendiente promedio alta de 5,64 %, que ante una crecida repentina puede ser una amenaza para la ciudad de Portovelo, sin embargo la pendiente del cauce en sus últimos kilómetros es baja, lo que se relaciona con los coeficientes de compacidad y circularidad obtenidos.

Es común que en los meses de febrero y marzo el río Amarillo tenga crecidas con afectaciones a la ciudad de Portovelo, siendo una de las más intensas en febrero del 2015 (El Universo, 2015). Es importante mencionar que el 85% de la cuenca hidrográfica se encuentra en alta susceptibilidad a movimientos de masa, y las crecidas

repentinas de los ríos además de las altas precipitaciones pueden estar asociadas a deslizamientos de tierra que taponan alguno o varios de sus tributarios.

La zona alta de la cuenca del Río Amarillo, está dentro del área de protección hídrica “Sur del Ecuador” (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2023), lo cual da inicio a la conservación de las fuentes de agua de la cuenca, sin embargo, respecto a la figura 7, las actividades de minería metálica se ubican en el margen izquierdo inferior del río Amarillo, cuyas bocaminas son visibles en la vía Portovelo – puente de Río Amarillo, y aún podrían contaminar sus tributarios como la quebrada Honda, y otros drenajes menores. La alta susceptibilidad a erosión en la cuenca hace necesario que las actividades antropogénicas se realicen tomando las medidas que permitan conservar el suelo y las fuentes de agua.

En el contexto de la división político administrativo las actividades antropogénicas que se realizan en el cantón Zaruma, afectan los servicios ecosistémicos de la cuenca del Río Amarillo, siendo uno de los principales afectados el cantón Portovelo, por lo que es importante la articulación

de actividades entre ambos cantones, para una gestión integral de la cuenca hidrográfica, esto, para implementar proyectos como un sistema de alerta temprana ante la amenaza de crecidas repentinas, un programa de monitoreo de la calidad del agua, un programa de capa-citación para mejores prácticas agropecuarias, así como el mantenimiento de las vías de acceso a los sitios turísticos cercanos al Río Amarillo como balnearios y aguas termales, todo esto con el acompañamiento de la Autoridad Única del Ambiente.

Por lo expuesto, utilizando el MDE SigTierras se recomienda caracterizar las unidades hidrográficas que comparten la divisoria de aguas con la del río Amarillo, como son el río Pindo en la cual existen nuevas actividades de plantas de beneficio para minería metálica, y del río Calera que está expuesto permanentemente a eventos de contaminación principalmente por la cercanía de sus orillas a de plantas de beneficio y relaveras,

En caso de no disponer del MDE mencionado, la segunda opción es el MDE JAXA de 12.5 m de resolución espacial, dado que para áreas de estudio similares, la precisión horizontal de los MDE evaluados mejora, cuanto mejor es la resolución espacial.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geográfico Militar de Ecuador por entregar la cartografía base escala 1:5000.

REFERENCIAS

- ALDHARAB, H.S.; ALI, S.A.; GHAREB, J.I.S.A. Analysis of Basin Geometry in Ataq Region, Part of Shabwah Yemen: Using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques. **Bulletin of Pure & Applied Sciences- Geology**, v. 38f, n. 1, p. 1, 2019.
- ASF DAAC. **PALSAR Radiometric Terrain Corrected high_res [Dataset]**. NASA Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center, 2014.
- AZIZ, K.M.A. & RASHWAN, K.S. Comparison of different resolutions of six free online DEMs with GPS elevation data on a new 6th of October City, Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, n. 20, p. 1585, 2022.
- BERREZUETA ALVARADO, E.R.; DOMÍNGUEZ CUESTA, M.J.; CARRIÓN, P.; BERREZUETA, T.; HERRERO, G. Propuesta metodológica para el aprovechamiento del patrimonio geológico minero de la zona Zaruma-Portovelo (Ecuador). **Trabajos de Geología**, v. 26, 2006.
- BUAKHAO, W. & KANGRANG, A. DEM Resolution Impact on the Estimation of the Physical Characteristics of Watersheds by Using SWAT. **Advances in Civil Engineering**, v. 1, p. 1-9, 2016.
- BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Geocarto International, v. 1, n. 3, p. 54, 1986.
- CAMINO, M.A.; BÓ, M.J.; CIONCHI, J.L.; LÓPEZ DE ARMENTIA, A.; DEL RÍO, J.L.; DE MARCO, S.G. Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). **Revista Universitaria de Geografía**, v. 27, n. 1, p. 73-97, 2018.
- CAMPOVERDE, C.; NORIEGA, R.; CARRIÓN, P.; PINDO, J.; RECALDE, E.; MORANTE, F. Análisis de subsidencia por la actividad minera en la ciudad de Zaruma-Patrimonio del Ecuador. Caso de estudio escuela La Inmaculada. **El Patrimonio Geológico y Minero: Identidad y Motor de Desarrollo**; Instituto Geológico y Minero de España; p. 1017–1031, 2019.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.; MAY, L. **Hidrología Aplicada**. MacGraw-Hill Interamericana, S.A., 1994.
- CONSORCIO POMCA QUINDÍO. **Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río la vieja**. Colombia, 2018. Disponible en https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-02/Documento_General_POMCA_LaVieja.pdf. Consultado el 25Ago2025.
- CRUZ ROMERO, B.; GASPARI, F.J.; RODRÍGUEZ VAGARÍA, A.M.; CARRILLO GONZÁLEZ, F.M.; TÉLLEZ LÓPEZ, J. Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. **Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes**, v. 23, n. 64, p. 26-34, 2015.
- D'OZOUVILLE, N.; DEFFONTAINES, B.; BENVENISTE, J.; WEGMÜLLER, U.; VIOLETTE, S.; DE MARSILY, G. DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 11, p. 4131-4147, 2008.
- DOAD, A.P.; WARGHAT, S.R.; KHADSE, S.P. Morphometric Analysis for Hydrological Studies using Geographical Information System: A Case Study. **International Journal of Engineering Research**, v. 1, n. 5, 2012.

- DRISYA, J. & SATHISH KUMAR, D. Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 9, n. 18, p. 710, 2016.
- EL UNIVERSO. **Cien casas en riesgo por la crecida de río en El Oro**. EL UNIVERSO, 2015. Disponible en: <https://www.eluniverso.com/noticias/2015/03/29/nota/4711546/cien-casas-riesgo-crecida-río-oro/>. Consultado el 20Jun2025.
- FATHY, I.; ABD-ELHAMID, H.; ZELENKOVA, M.; KAPOZTASOVA, D. Effect of Topographic Data Accuracy on Watershed Management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 21, p. 4245, 2019.
- GILLIN, C.P.; BAILEY, S.W.; MCGUIRE, K.J.; PRISLEY, S.P. Evaluation of Lidar-derived DEMs through Terrain Analysis and Field Comparison. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 81, n. 5, p. 387-396, 2015.
- Gravelius, H. *Flusskunde*. Götschen'sche Verlagshandlung, 176 p., 1914.
- HEBELER, F. & PURVES, R. S. The influence of elevation uncertainty on derivation of topographic indices. *Geomorphology*, v. 111, n. (1-2), p. 4-16, 2009.
- HORTON, R.E. Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 13, n. 1, p. 350-361, 1932.
- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, v. 56, n. 3, p. 275, 1945.
- HUANG, J.; WEI, L.; CHEN, T.; LUO, M.; YANG, H.; SANG, Y. Evaluation of DEM Accuracy Improvement Methods Based on Multi-Source Data Fusion in Typical Gully Areas of Loess Plateau. *Sensors*, v. 23, n. 8, p. 3878, 2023.
- IBÁÑEZ ASENSIO, S.; MORENO RAMÓN, H.; GISBERT BLANQUER, J.M. *Morfología de las cuencas hidrológicas*. 2011. Disponible en: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/10782>. Consultado el 02Sep2025.
- IBISATE, A. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, n. 38, p. 311-323, 2004.
- KELLY, J.T. & GONTZ, A.M. Using GPS-surveyed intertidal zones to determine the validity of shorelines automatically mapped by Landsat water indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 65, p. 92-104, 2018.
- KUMAR, A.; KUMAR, S.; DESHMUKH, B. Geoecological integrity index for assessment and prioritisation of watersheds in the Indian northwestern Himalayan region using geoinformatics. *Journal of Earth System Science*, v. 130, n. 19, p. 1, 2021.
- KUMAR, P.; KUMAR, S.; MANCHANDA, M.L. Satellite stereo data for dem surfaces and derivatives. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 32, p. 81-90, 2004.
- LIN, S.; JING, C.; COLES, N. A.; CHAPLOT, V.; MOORE, N.J.; WU, J. Evaluating DEM source and resolution uncertainties in the Soil and Water Assessment Tool. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 27, p. 209-221, 2013.
- MAZAHIR, S.; JAVED, A.; KHANDAY, M.Y. Drainage Basin Characteristics of Dhund River Basin, Eastern Rajasthan India, Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of Geographic Information System*, v. 14, n. 04, p. 347-363, 2022.
- MCNALLY, J.M. & SOUTO, L. Utilizing Citizen Science as a Tool for Muck Mapping in the Indian River Lagoon. *Marine Technology Society Journal*, v. 52, n. 4, p. 81-87, 2018.
- METZ, M.; MITASOVA, H.; HARMON, R.S. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 2, p. 667-678, 2011.
- MILLER, V.C. A **Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area**, Virginia and Tennessee. Department of Geology, Columbia University, 1953.
- MINASNY, B. & MCBRATNEY, A. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, v. 264, p. 301-311, 2016.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA. **Toma de fotografía aérea y elaboración de ortofotografía a escala 1:5000** [Dataset], 2017. Disponible en: <http://www.sigtierras.gob.ec/centro-geomatico-virtual/>
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, AGUA Y TRANSICIÓN ECOLÓGICA. **Áreas de protección hídrica** [Dataset], 2023. Disponible en <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>.
- MOGES, D.M.; VIRRO, H.; KMOCH, A.; CIBIN, R.; ROHITH, A. N.; MARTÍNEZ-SALVADOR, A.; CONESA-GARCÍA, C.; UUEMAA, E. How does the choice of DEMs affect catchment hydrological modeling?. *Science of The Total Environment*, v. 892, 2023.
- MORISAWA, M. & CLAYTON, K.M. **Rivers: Form and Process**. Longman, 1985.
- MUNOTH, P. & GOYAL, R. Effects of DEM Source, Spatial Resolution and Drainage Area Threshold Values on Hydrological Modeling. *Water Resources Management*, v. 33, n. 9, p. 3303-3319, 2019.
- MURPHY, P.N.; OGILVIE, J.; MENG, F.R.; ARP, P. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: A comparison and field verification. *Hydrological Processes: An International Journal*, v. 22, n. 12, p. 1747-1754, 2008.
- NASA JPL. **NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center**, 2013.
- NASA/METI/AIST/JAPAN SPACESYSTEMS AND U.S./JAPAN ASTER SCIENCE TEAM. **ASTER Global Digital Elevation Model V003** [Dataset]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2019.
- NAZARI-SHARABIAN, M.; TAHERIYOUN, M.; KARAKOUZIAN, M. Sensitivity analysis of the DEM resolution and effective parameters of runoff yield in the SWAT model: A case study. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, v. 69, n. 1, p. 39-54, 2020.
- NIH ROORKEE - NATIONAL INSTITUTE OF HIDROLOGY ROORKEE. **Guidelines for hydrological investigations in a small watershed**. 1998. Disponible en: https://admin.indiawaterportal.org/sites/default/files/iwp2/Guidelines_for_hydrological_investigations_in_a_small_watershed_NIH_1997_98.pdf. Consultado el 02Sep2025.
- PRZYBYŁA, C. & PYSZNY, K. Comparison of digital elevation models SRTM and ASTER GDEM and evaluation of the possibility of their use in hydrological modeling in areas of low drop. *Rocznik Ochrona Środowiska*, v. 15, n. 1, p. 1489-1510, 2013.
- QGIS.org. **Quantum GIS (Versión 3.28.6)** [Software]. <http://www.qgis.org>, 2023.
- ROSGEN, D.; ROSGEN, B.; COLLINS, S.; NANKERVIS, J.; WRIGHT, K. **Waldo Canyon Fire Watershed Assessment: The WARSSS Results**. Wildland Hydrology. (2013). Disponible en: <https://cusp.ws/wp-content/uploads/2014/10/3.AppendixB.StreamClassificationCumpdf.pdf>. Consultado el 05Sep2025.
- RODRÍGUEZ CALDERÓN, J. DE LA C.; VALCARCE, R.M.; VEGA CARREÑO, M.B.; RODRÍGUEZ MIRANDA, W.R. Análisis espacial de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Cauto, Cuba, empleando k-medias e imágenes satelitales. *Geociências*, v. 44, n. 3, p. 377 - 396, 2025.
- SAUER, W. **Geología del Ecuador (Primera)**. Ministerio de Educación de Ecuador, 1965.
- SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in

- badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597, 1956.
- SHI, X.; GIROD, L.; LONG, R.; DEKETT, R.; PHILIPPE, J.; BURKE, T. A comparison of LiDAR-based DEMs and USGS-sourced DEMs in terrain analysis for knowledge-based digital soil mapping. **Geoderma**, v. 170, p. 217-226, 2012.
- SINDAYIHEBURA, A.; MEIRVENNE, M. V.; NSABIMANA, S. Comparison of Methods for Deriving a Digital Elevation Model from Contours and Modelling of the Associated Uncertainty. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL ACCURACY ASSESSMENT IN NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL SCIENCES, p. 181-190, 2006.
- SINGH, V.P. & WOOLHISER, D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 4, p. 270-292, 2002.
- SREEDEVI, P.D.; OWAIS, S.; KHAN, H. H.; AHMED, S. Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. **Journal of the Geological Society of India**, v. 73, n. 4, p. 543-552, 2009.
- STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117, 1952.
- STRYDOM, T.; SMIT, I. P. J.; GOVENDER, N.; COETSEE, C.; SINGH, J.; DAVIES, A. B.; VAN WILGEN, B.W. High-intensity fires may have limited medium-term effectiveness for reversing woody plant encroachment in an African savanna. **Journal of Applied Ecology**, v. 60, n. 4, p. 661-672, 2023.
- SUKRISTİYANTI, S.; MARIA, R.; LESTIANA, H. Watershed-based Morphometric Analysis: A Review. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 118, n.1, p. 012028, 2018.
- WOLF, T. **Geografía y geología del Ecuador; publicada por orden del supremo gobierno de la república por Teodoro Wolf**. Tipografía de FA Brockhaus, 1892.

Submetido em 9 de novembro de 2025

Aceito para publicação em 26 de fevereiro de 2026