

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA APLICAR MODELOS DIGITALES DEL TERRENO A LOS PALSAR EN LA DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR APPLYING DIGITAL TERRAIN MODELS TO ALOS PALSAR IN WATERSHED DELIMITATION

Fecha de recepción: 31/05/2023 | Fecha de aceptación: 27/11/2023

Autor:

Mario Carmelo Gamarra Mendoza¹

¹Ingeniero Civil, Docente Investigador Centro de Investigación del Agua CIAGUA en la UAJMS

Correspondencia del autor: mcgamarramendoza@gmail.com¹

Tarija - Bolivia

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, pretende exponer una metodología para evaluar modelos digitales del terreno que permitan establecer un marco razonable de confiabilidad en la delimitación de una cuenca y la determinación de sus parámetros morfométricos.

Se han analizado tres tipos de modelos digitales del terreno (DTM) disponibles para su descarga gratuita, del portal NASA Earth Observation Data, estos son SRTM, ASTER GDEM, y ALOS PALSAR.

Para la evaluación y procesamiento de los DTM se ha empleado el software ArcGIS, y para la determinación de los parámetros morfométricos de las cuencas se ha empleado el software HEC-HMS. Para la evaluación estadística se ha empleado Microsoft Excel.

La metodología se ha aplicado en el área de la Cuenca Pedagógica Yesera, y se pudo establecer que el mejor DTM es el ALOS PALSAR, y se ha establecido una recomendación de cómo emplear la matriz de correlación de componentes principales para elegir el DTM ALOS PALSAR que mejor representa el terreno.

Se puede replicar la metodología planteada a diversas cuencas, asimismo demanda la observación cualidades de la zona analizada, como ser deformaciones del terreno, a través de deslizamientos, terremotos, subsidencia, actividad volcánica, caída de meteoritos, entre otros fenómenos.

ABSTRACT

The present research aims to propose a methodology for assessing digital terrain models (DTMs) that allow establishing a reasonable framework of reliability in watershed delimitation and the determination of its morphometric parameters.

Three types of freely downloadable digital terrain models (DTMs) from the NASA Earth Observation Data portal have been analyzed, namely SRTM, ASTER GDEM, and ALOS PALSAR.

For the evaluation and processing of DTMs, ArcGIS software has been employed, and for determining the morphometric parameters of the watersheds, HEC-HMS software has been used. Microsoft Excel has been used for statistical evaluation.

The methodology has been applied in the Pedagogical Yesera Watershed area, revealing that the ALOS PALSAR DTM performs the best. A recommendation has been established on how to use the principal component correlation matrix to choose the ALOS PALSAR DTM that best represents the terrain.

The proposed methodology can be replicated in various watersheds, but it also requires observing the specific qualities of the analyzed area, such as terrain deformations through landslides, earthquakes, subsidence, volcanic activity, meteorite falls, among other phenomena.

Palabras Clave: Modelo digital del terreno, ALOS PALSAR, componentes principales, cuencas hidrográficas

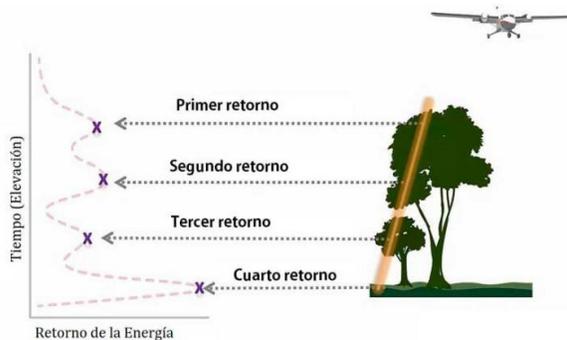
Keywords: Digital Terrain Model, ALOS PALSAR, Principal Components, Watersheds

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (DTM). Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo. Para entender esta caracterización de la superficie terrestre, es importante considerar ciertas definiciones que se detallan a continuación.

¿Qué es un Modelo Digital de Superficie (DSM)? El Modelo Digital de Superficie (DSM) representa las elevaciones sobre el nivel del mar de las superficies reflectantes de árboles, edificios y otras características elevadas sobre la «Tierra desnuda». En un sistema LiDAR (Light Detection and Ranging), los pulsos de luz viajan al suelo. Cuando el pulso de luz rebota de su objetivo y regresa al sensor, da el rango (una distancia variable) a la Tierra. Por lo tanto, este sistema se ganó su nombre de LIDAR. (ArcGeek, 2018)

Figura 1: Detección y alcance de luz aérea (LiDAR)



Fuente: (ArcGeek, 2018)

¿Qué es un Modelo Digital de Elevación (DEM)? Un modelo digital de elevación es una matriz de celdas de tierra desnuda referida a un dato vertical. Cuando se filtra puntos no terrestres como puentes y carreteras, se obtiene un modelo de elevación digital suave. Los edificios construidos (líneas eléctricas, edificios y torres) y naturales (árboles y otros tipos de vegetación) no están incluidos en un DEM.

¿Qué es un Modelo Digital de Terreno (DTM)? Un Modelo Digital del Terreno (DTM) puede describir-

se como una representación tridimensional de una superficie del terreno consistente en coordenadas X, Y, Z almacenadas en forma digital. Incluye no sólo alturas y elevaciones, sino también otros elementos geográficos y características naturales como ríos, líneas de crestas, etc. Un DTM es efectivamente un DEM que se ha incrementado con elementos tales como líneas de ruptura y observaciones que no son los datos originales para corregir los artefactos producidos utilizando sólo los datos originales.

Figura 2: Representación de DTM y DSM



Fuente: (ArcGeek, 2018)

En pocas palabras, un DSM crea un relieve de la tierra incluyendo la vegetación, edificaciones y objetos presentes. Un DEM solamente muestra el relieve del suelo. Un DTM es un DEM que incorpora otros elementos geográficos como crestas, líneas de ruptura, ríos, etc.

Principalmente las referencias y el avance en los estudios de los DTM están orientados a 5 aspectos:

- Ajuste de los modelos digitales del terreno a puntos de control en tierra
- Comparación de los modelos digitales de terreno globales
- Integración/Fusión de los modelos digitales de terreno globales
- Aplicaciones de los modelos digitales de terreno a estudios de fenómenos naturales

- Extracción de parámetros morfométricos de los modelos digitales del terreno

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Existen diversas técnicas aisladas que se han desarrollado hasta la fecha para evaluar modelos digitales del terreno, considerando diversos enfoques de análisis, principalmente orientadas desde una perspectiva de validar los valores topográficos del mismo, sin embargo, sin establecer su incidencia en la determinación de los parámetros morfométricos que permiten inferir ciertas propiedades hidrológicas de las cuencas hidrográficas que se analizan con tal información.

La determinación de parámetros morfométricos de una cuenca, útiles para la estimación de parámetros hidrológicos de una cuenca, requiere el empleo de información como lo representan los modelos digitales del terreno, que actualmente se tienen a disposición de varias fuentes como lo son SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR, con resoluciones diferenciadas entre sí. La evaluación de sus características de los modelos digitales del terreno actuales y su desempeño para obtener los parámetros morfométricos es muy importante para el desarrollo de los análisis hidrológicos de una cuenca y también para la correcta codificación Pfafstetter de la misma.

Hasta la fecha se han realizado principalmente investigaciones de campo, mediante la obtención de coordenadas GPS de los diversos puntos en el terreno, con la finalidad de comparar tales valores con los que exponen los modelos digitales del terreno disponibles de manera gratuita y acceso público, con el objeto de validar los valores de la elevación de los modelos digitales del terreno, entre los cuales los principales exponentes son SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR.

En un caso particular, si bien se han analizado en otros trabajos diversas características de los modelos digitales de terreno ALOS PALSAR, ninguno de los estudios establece con claridad el tratamiento a rea-

lizar para seleccionar un modelo de terreno de una fecha en particular, pues en el caso de ALOS PALSAR existe una gran variedad de información obtenida en diferentes fechas de tránsito del satélite.

Es por ello que se observa la necesidad de desarrollar una metodología que contribuya en la selección de los modelos digitales del terreno que mejor representan la topografía de una cuenca, y que permita determinar sus parámetros morfométricos de la manera más adecuada.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Es posible desarrollar una metodología para evaluar la aptitud de uso de un modelo digital del terreno para su aplicación en la determinación de parámetros morfométricos de una cuenca?

JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Es necesario desarrollar una herramienta metodológica para evaluar las características de cada modelo digital del terreno de descarga libre y sin cargo en precio alguno, considerando sus propiedades individuales de los mismos, en particular los modelos SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR. Tal metodología debe permitir estimar los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica de manera correcta para el desarrollo de estudios hidrológicos.

OBJETIVOS

Evaluar las características de los modelos digitales del terreno SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR y el desempeño en su aplicación para la determinación de parámetros morfométricos de la Cuenca Pedagógica Yesera.

Para lograr alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Delimitar la zona de análisis de la Cuenca Pedagógica Yesera
- Seleccionar los modelos digitales del terreno SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR que corres-

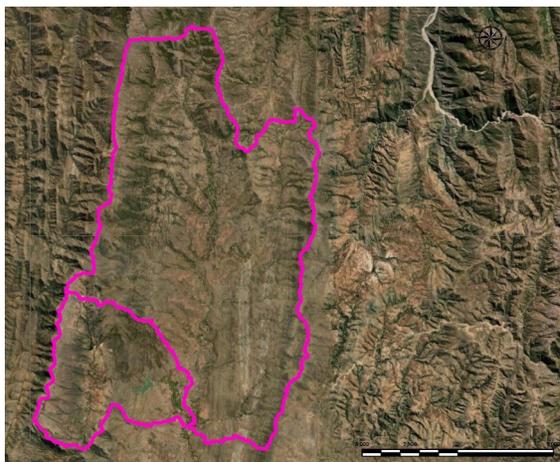
ponden con la zona de análisis de la Cuenca Pedagógica Yesera

- Desarrollar una metodología para seleccionar el modelo digital del terreno ALOS PALSAR que mejor representa a la zona de análisis
- Extraer el sector de cada modelo digital del terreno mediante el empleo de la herramienta ArcGIS 10.8
- Delimitar las cuencas hidrográficas y determinar los parámetros morfométricos empleando la herramienta GIS del software HEC-HMS para crear el modelo de cuenca
- Realizar el análisis estadístico y comparativo de los parámetros morfométricos que corresponden a los modelos digitales de terreno SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionado es la Cuenca Pedagógica Yesera, por condiciones de la coordinación de posgrado. La delimitación de la cuenca ha sido proporcionada por el Proyecto Cuenca Pedagógica Yesera. A continuación, se presenta el área de estudio:

Figura 3: Imagen satelital de la Cuenca Pedagógica Yesera



Fuente: Elaboración Propia en base al mapa oficial del Proyecto Cuenca Pedagógica Yesera

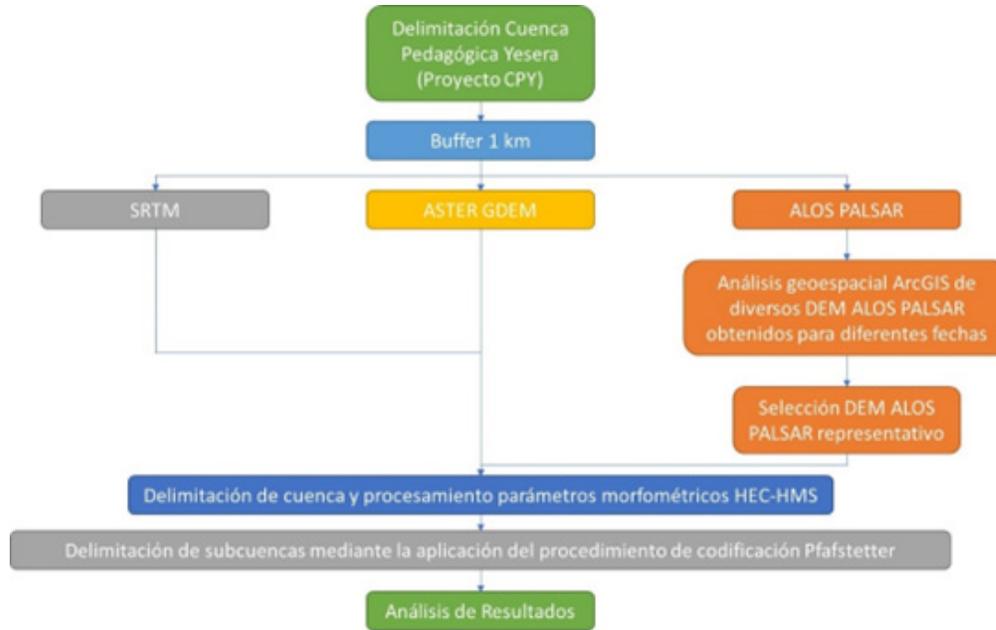
2. MATERIALES Y MÉTODOS

Luego de analizar la información bibliográfica se puede establecer el siguiente criterio:

- Los modelos digitales del terreno pueden ser proporcionados como un solo conjunto de datos como lo representan el SRTM y ASTER GDEM.
- La oferta multitemporal es únicamente ofertada para los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR que se encuentran disponibles para diferentes fechas de obtención.
- Existe la necesidad de observar y considerar la evaluación técnica de los patrones de evolución natural y la influencia antrópica en el área de análisis (como por ejemplo terremotos, deslizamientos, subsidencia, dinámica de humedales naturales y artificiales, construcción de embalses, entre otros)
- La órbita ascendente y descendente de los modelos digitales del terreno en los datos ALOS PALSAR es relevante a la hora de realizar su análisis geoespacial
- No se ha planteado hasta la fecha una técnica de selección de modelos digitales de terreno ALOS PALSAR de las alternativas multitemporales disponibles
- Las herramientas disponibles con el software HEC-HMS para delimitar subcuencas y de la red de drenaje permite obtener sus parámetros morfométricos de una manera versátil, rápida y de amplia aplicación
- Mediante la aplicación del proceso de delimitación basado en la codificación de subcuencas Pfafstetter se comparan los parámetros morfométricos de subcuencas de una extensión adecuada (MMAyA Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2009)

A continuación, se representa el esquema de la metodología planteada para el desarrollo de la presente investigación.

Figura 4: Esquema metodológico



Fuente: Elaboración Propia

La metodología se enfoca en la comparación de las características intrínsecas de la información original de las diferentes fuentes de modelos digitales del terreno, sin considerar una validación con puntos de control en campo, pues la bibliografía consultada expone que las diferencias se encuentran en rangos aceptables, independientemente de la región geográfica en donde se realice tal verificación.

INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para realizar la presente investigación se han empleado los siguientes datos:

- Modelo digital del terreno SRTM S20W065.hgt, NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003, que es un archivo de altura SRTM sin procesar que contienen la elevación medida en metros por encima del nivel del mar

en una proyección geográfica (conjunto de latitud y longitud), con vacíos que se indican usando -32768. (NASA - National Aeronautics and Space Administration, 2022)

- Modelo digital del terreno ASTER GDEM ASTGT-MV003_S22W065_dem.tif, ASTER Global Digital Elevation Model V003. (NASA - National Aeronautics and Space Administration, 2022)
- Para el caso de los modelos digitales ALOS PALSAR se emplearon los catalogados a continuación (NASA - National Aeronautics and Space Administration, 2022):

La siguiente tabla presenta un resumen de la información ALOS PALSAR disponible, para diferentes fechas de la órbita satelital que corresponde con la captura del modelo digital del terreno.

Tabla 1. Lista de modelos digitales del terreno ALOS PALSAR

Código	Archivo	Fecha/Hora inicio captura	Fecha/Hora fin captura
1	AP_05339_FBS_F6750_RT1.tif	25/1/2007 03:20:51	25/1/2007 03:20:59
2	AP_08023_FBD_F6750_RT1.tif	28/7/2007 03:20:53	28/7/2007 03:21:02
3	AP_08694_FBD_F6750_RT1.tif	12/9/2007 03:20:43	29/9/2007 14:16:52
4	AP_08949_FBD_F4050_RT1.tif	29/9/2007 14:16:44	29/9/2007 14:16:52
5	AP_09620_FBD_F4050_RT1.tif	14/11/2007 14:16:24	14/11/2007 14:16:32
6	AP_10291_FBD_F4050_RT1.tif	30/12/2007 14:16:01	30/12/2007 14:16:09
7	AP_14062_FBD_F6750_RT1.tif	14/9/2008 03:18:32	14/9/2008 03:18:40
8	AP_16075_FBS_F6750_RT1.tif	30/1/2009 03:20:51	30/1/2009 03:20:59
9	AP_18759_FBD_F6750_RT1.tif	2/8/2009 03:22:23	2/8/2009 03:22:31
10	AP_19430_FBD_F6750_RT1.tif	17/9/2009 03:22:34	17/9/2009 03:22:43
11	AP_20451_PLR_F6760_RT1.tif	26/11/2009 03:14:12	26/11/2009 03:14:22
12	AP_21443_FBS_F6750_RT1.tif	2/2/2010 03:22:31	2/2/2010 03:22:39
13	AP_22114_FBS_F6750_RT1.tif	20/3/2010 03:22:14	20/3/2010 03:22:23
14	AP_23456_FBD_F6750_RT1.tif	20/6/2010 03:21:24	20/6/2010 03:21:28
15	AP_24127_FBD_F6750_RT1.tif	5/8/2010 03:20:53	5/8/2010 03:20:58
16	AP_26140_FBS_F6750_RT1.tif	21/12/2010 03:18:48	21/12/2010 03:18:53
17	AP_26811_FBS_F6750_RT1.tif	5/2/2011 03:17:53	5/2/2011 03:17:57

Fuente: Elaboración propia

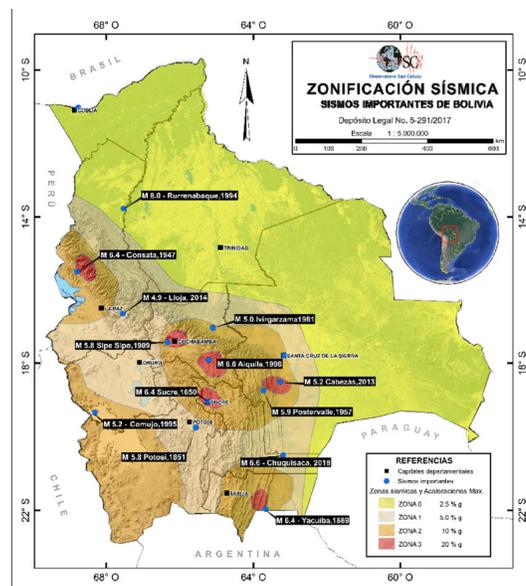
- Para observar la influencia de fenómenos naturales de carácter geológico y geotécnico, principalmente de subsidencia y sísmica, se ha empleado la siguiente fuente de datos:
- Mapas globales de susceptibilidad de subsidencia del terreno (UNESCO, 2021)
- Mapa de historia sísmica de Bolivia (MOPSV - Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, 2020)

Figura 5: Mapa de susceptibilidad a la subsidencia



Fuente (UNESCO, 2021)

Figura 6: Mapa de historia sísmica de Bolivia



Fuente: (MOPSV - Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, 2020)

ESTADO DEL ARTE

La producción y renovación de mapas topográficos a escala global (infraestructura de datos espaciales):

ALOS tiene como objetivo específico obtener con éxito medidas dimensionales de la tierra con una precisión de menos de 5 metros en cuanto a altitud topográfica, con un intervalo de cuadrículas de unos 10 metros (que es más o menos equivalente a un mapa topográfico de 1:25.000). Como la tecnología de medición de la elevación del terreno de las imágenes está relativamente bien establecida, la situación es ventajosa para las observaciones por satélites. Además, al superponer datos topográficos de altitud con datos de alta resolución sensores fotovoltáicos y radar de apertura sintética (SAR), la información sobre la vegetación y el suelo se puede proporcionar como una unidad combinada. Con respecto a las regiones donde los datos topográficos de altitud han sido bien compilados, ahora es posible hacer observaciones enfocándose en los cambios en la superficie de la Tierra. Este tipo de datos constituye la base de datos espaciales a escala mundial. (JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency, 2008).

En cuanto a la comparación de DTM empleando puntos de control en tierra (GPC por sus siglas en inglés), en Iraq fue realizado un estudio de tres GDEM extraídos, SRTM DEM, ALOS PALSAR DEM y TanDEM-X, con diferentes resoluciones, están validados en el estudio basado en los tres criterios diferentes, incluido el RMSE, detección de valores atípicos y el número de órdenes de flujo extraídos de un mapa de cuencas. De hecho, los DEM derivados de puntos del GPS de mano dan mejores resultados en comparación con los GDEM cuando los valores atípicos son descartados. Se detectaron más tipos de arroyos en el mapa de cuencas en ALOS PALSAR DEM que SRTM DEM, que a su vez era más preciso que el TanDEM-X. El GPS DEM también detectó igual número de órdenes de flujo como ALOS PALSAR DEM pero con un claro e imágenes distorsionadas, esto se debió al número limitado de los puntos GPS portátiles que estaban disponibles para este estudio. La precisión vertical (es decir, las alturas) de los GDEM se validaron a través de los GCP. El RMSE de las discrepancias de altura de ALOS PALSAR y los DEM SRTM,

así como el TanDEM-X muestran $\pm 7,3$ m, $\pm 7,6$ m y $\pm 6,5$ m, respectivamente. Los resultados mostraron que el número de valores atípicos en comparación con la altura de 12 GCP (10 o más) fue de 1 (8%) en el TanDEM-X y 2 (16%) en los DEM ALOS PALSAR y SRTM. Se han extraído cuatro mapas de cuencas hidrográficas de los GDEM y DEM de GPS. Nueve tipos de arroyos han sido identificados en el ALOS PALSAR DEM, seguido de ocho tipos en el SRTM DEM, y seis tipos en el TanDEM-X. El GPS DEM también identificó nueve tipos de arroyos. En resumen, de acuerdo con los criterios formulados que incluyen la RMSE, detección de valores atípicos y el número de órdenes de transmisión extraídas de los mapas de cuencas. La mejor combinación horizontal y vertical la precisión de los DEM óptimos para el área de estudio es el ALOS PALSAR DEM 12,5 m. Mientras que el SRTM DEM 30m y TanDEM-X 90 m ocuparon el segundo y tercer lugar respectivamente con ligeras diferencias entre ellos (Jamal Jalal, et al., 2020).

Una investigación desarrollada en Marruecos, África, ha evaluado cuatro de los modelos de elevación digitales actualizados y de código abierto con información precisa sobre el terreno en la cuenca del M'Goun usando DEM a diferente resolución espacial: SRTM 3-arcsec, SRTMGL1 V003 1-arcsec, ASTER GDEM 1 -arcsec, y ALOS PALSAR. La conversión de DEM en la misma resolución es un paso crítico antes de evaluar su precisión. Los DEM con la resolución más alta (ALOS PALSAR 12,5 m) dieron los mejores rendimientos con menor incertidumbre y sus precisiones horizontales y verticales son excelentes en comparación con los DEM con baja resolución. En cuanto a los DEM con la misma resolución de 30 m, los resultados muestran que SRTM 1-arcsec funciona mejor que ASTER GDEM 1-arcsec. En esta resolución espacial más alta, así como SRTM 1-arcsec funciona mejor [32,63,64]. El DEM SRTM de 3 segundos de arco proporcionó la peor precisión en comparación con los otros tres DEM. El DEM ALOS-PALSAR es más preciso para evaluar la vulnerabilidad a la erosión hídrica en una cuenca alta, el aumento de la

resolución espacial conduce a la claridad del factor de erosión y de la delimitación de áreas vulnerables al riesgo de erosión hídrica. (Maryam, et al., 2020)

En un estudio desarrollado sobre terremotos aplicado a una región de Japón, se analizaron diferentes conjuntos de datos y de diferentes tamaños, producidos a partir de imágenes de teledetección en rápidos terremotos. Se investigó el mapeo de deslizamientos, y en este contexto, se crearon conjuntos de datos basados en cambios posteriores al evento para cinco modelos en un área de prueba. El algoritmo de bosque aleatorio (RF) se utilizó para el mapeo de deslizamiento de taludes. Cuando los clasificadores de RF se desarrollaron en el modelo se aplicaron al área de prueba, y se obtuvieron altas precisiones para todas las áreas del modelo y conjuntos de datos. Sin embargo, un poco más alta precisión de los resultados se ha logrado con conjuntos de datos posteriores al evento, en comparación con las fechas basadas en los cambios. Del mismo modo, se obtuvo un poco más alta la precisión cuando el tamaño del área del modelo aumentó. Cuando se evalúan estos resultados, la detección rápida del lugar donde ocurren los deslizamientos de taludes provocados por el terremoto: 1) los modelos que se utilizarán en el mapeo de deslizamientos de taludes se pueden desarrollar a lo largo de un área pequeña que mejor representa el área a ser mapeada, y 2) en el proceso de mapeo de deslizamientos de terreno, los deslizamientos de terreno se pueden detectar con éxito en las imágenes posteriores al evento sin la imagen de archivo del área relevante. También, el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) generados a partir de imágenes posteriores al evento se incluyen en los datos posteriores al evento. Dado que estos componentes afectan positivamente las precisiones de clasificación, se pueden incluir en el post-evento conjuntos de datos en futuros estudios. El enfoque presentado en el estudio es un método apropiado para detectar grandes deslizamientos de tierra que ocurren después de un desastre natural y responder rápidamente. (Comert, 2021)

Para el procesamiento de parámetros morfométricos, el software HEC-HMS tiene un menú "GIS" que posee muchas herramientas para las funciones de delimitación de cuencas hidrográficas, el menú sirve como hoja de ruta: el flujo de trabajo procede de arriba hacia abajo en orden. Para la determinación de parámetros morfométricos de la cuenca y de la red de drenaje tiene disponible el menú "Parameters", para el procesamiento de datos geoespaciales que son cada vez más abundantes en la comunidad de ciencias de la tierra y muchos parámetros de modelado hidrológico. El submenú "Basin Characteristics" realiza estimaciones de las características geoespaciales de la subcuenca empleando el HEC-HMS. Para calcular las características de las subcuencas, el modelo de cuenca debe tener subcuencas georreferenciadas. (HEC Hydrologic Engineering Center, 2021). Los parámetros morfométricos de la subcuenca calculados incluyen:

- Longitud de ruta de flujo más larga (Longitud del Cauce Principal)
- Pendiente de ruta de flujo más larga (Pendiente del Cauce Principal)
- Longitud de la ruta de flujo centroidal
- Pendiente centroidal de la ruta de flujo
- 10-85 longitud de la ruta de flujo
- Pendiente 10-85
- Pendiente de la cuenca
- Relieve de la cuenca
- Relación de alivio (Desnivel de la cuenca entre la longitud del cauce principal)
- Relación de elongación
- Densidad de drenaje

Los antecedentes expuestos anteriormente establecen un marco general de consideraciones técnicas importantes sobre los modelos digitales del terreno,

tanto al exponer sus características técnicas, sobre la tecnología empleada para su obtención, los métodos de validación de la información que proporcionan, y los procedimientos empleados para la mejora de sus propiedades, como así también de los métodos empleados para su aplicación en diversos ámbitos como ser hidrología, topografía, medio ambiente, entre otros.

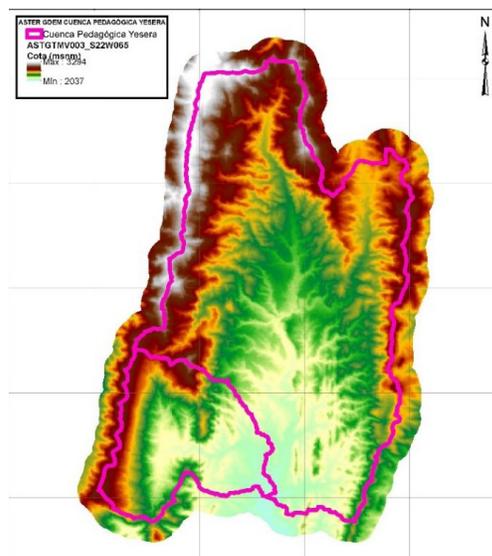
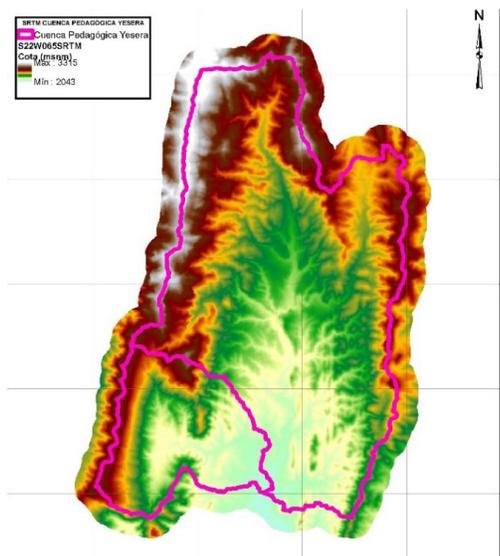
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Exploración de características de modelos digitales de terreno

Para la zona de estudio, en el caso de los modelos digitales del terreno, se obtuvieron considerando la información base proporcionada por el Proyecto Cuenca Pedagógica Yesera, a la cual se aplicó un buffer de 1 km.

El modelo digital del terreno SRTM tiene un rango de elevaciones comprendido entre los 2043 msnm y 3315 msnm. El modelo digital del terreno ASTER GDEM tiene un rango de elevaciones comprendido entre los 2037 msnm y 3294 msnm. En las siguientes figuras se observa el modelo digital del terreno SRTM y ASTER GDEM de la Cuenca Pedagógica Yesera.

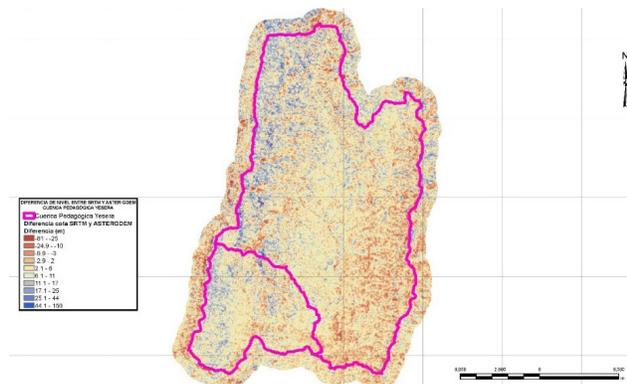
Figura 7: SRTM y ASTER GDEM Cuenca Pedagógica Yesera



Fuente: Elaboración propia

La siguiente imagen muestra la diferencia de los modelos digitales del terreno SRTM y ALOS PALSAR en el área de estudio, exponiendo diferencias que se encuentran en un amplio rango entre -81 m y 150 m, entre ambos MDTs. Se observa que tal diferencia se distribuye de manera aleatoria en toda la extensión del área de la Cuenca Pedagógica Yesera.

Figura 8: Diferencia de nivel entre los modelos digitales de terreno SRTM y ASTER GDEM Cuenca Pedagógica Yesera



Fuente: Elaboración propia

El modelo digital del terreno ALOS PALSAR tiene diversas opciones para cada una de las fechas analizadas, con rangos de elevaciones comprendidos entre los 2078 msnm y 3351 msnm.

Se observa que las elevaciones entre cada uno de los modelos digitales de terreno expuestos son muy diferentes, principalmente en las cotas más elevadas. La siguiente tabla ilustra la anterior afirmación:

Tabla 2. Características de los modelos digitales del terreno analizados en la zona de estudio de la Cuenca Pedagógica Yesera

Modelo digital del terreno	Cota (msnm)	
	Mínima	Máxima
SRTM	2043	3315
ASTER GDEM	2037	3294
ALOS PALSAR	2078	3351

Fuente: Elaboración propia

Además de las diferencias en elevaciones de los tres modelos digitales de elevaciones analizados, la resolución espacial de los mismos es diferente, pues en el caso de SRTM y ASTER GDEM la resolución del pixel es de 30 m, mientras que para el caso de ALOS PALSAR la resolución del pixel es igual a 12.5 m.

Los modelos digitales de terreno ALOS PALSAR empleados en la presente investigación tienen las siguientes características del registro de la elevación del terreno.

Tabla 3. Características ALOS PALSAR

ALOS PALSAR	Cota (msnm)			Desviación estándar (m)
	Mínimo	Máximo	Media	
AP_26811_FBS_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.849	250.209
AP_26140_FBS_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.847	250.213
AP_24127_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.847	250.212
AP_23456_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.848	250.211
AP_22114_FBS_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.851	250.212
AP_21443_FBS_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.854	250.211
AP_20451_PLR_F6760_RT1.tif	2078	3351	2504.848	250.209
AP_19430_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.848	250.208
AP_18759_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.845	250.210
AP_16075_FBS_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.854	250.214
AP_14062_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.845	250.211
AP_10291_FBD_F4050_RT1.tif	2078	3351	2504.857	250.213
AP_09620_FBD_F4050_RT1.tif	2078	3351	2504.854	250.211
AP_08949_FBD_F4050_RT1.tif	2078	3351	2504.849	250.209
AP_08694_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3351	2505.088	250.289
AP_08023_FBD_F6750_RT1.tif	2078	3350	2505.089	250.289
AP_05339_FBS_F6750_RT1.tif	2078	3351	2504.850	250.211

Fuente: Elaboración propia

La anterior tabla expone que los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR de diferentes fechas de captación u obtención tienen características similares en cuanto a la elevación se refiere. Sin embargo, si analizamos cada celda mediante el procesamiento geoestadístico de los modelos digitales del terreno

ALOS PALSAR, se observa que existe una amplia variación de los valores principalmente localizados en las zonas altas de la cuenca, que expone una variación de los valores que difieren entre sí hasta en 106 m, este hecho es correlacionado con la mayor desviación estándar de los valores registrados de la

elevación que tiene valores en las zonas de mayor elevación de la cuenca de hasta 31.743 m, y también es correspondiente con la presencia de valores únicos de elevación más diversos en las zonas altas de la cuenca.

Selección del modelo digital de terreno ALOS PALSAR

Para seleccionar el modelo digital del terreno ALOS PALSAR más adecuado, se ha planteado un análisis de correlación entre los modelos digitales del terreno de cada uno de los 17 que se han empleado de diferentes fechas.

Se ha planteado el análisis de matriz de correlación, debido a que las referencias bibliográficas revisadas sobre los modelos digitales del terreno, en relación a los datos ALOS PALSAR establece un valor de la raíz del error cuadrático medio RMSE que expone el me-

jor ajuste del modelo digital del terreno a los valores relevados en campo con puntos de control fijos en terreno, independientemente del lugar y tiempo de obtención del modelo digital del terreno ALOS PALSAR, como así también al hecho de que existe una diferencia de elevaciones entre las captaciones que modelos digitales del terreno en órbita ascendente y descendente en sectores de terrenos altos principalmente hace necesario que evaluemos todos los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR disponibles, y considerando que en la bibliografía revisada no existe un método planteado para seleccionar un modelo ALOS PALSAR específico, la herramienta geoestadística de correlación de los modelos digitales del terreno exponen una alternativa tecnológica de versátil aplicación a diferentes zonas. A continuación, se muestra la matriz de correlación analizada.

Tabla 4. Matriz de correlación de los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR

		Código del modelo digital del terreno ALOS PALSAR																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Código del modelo digital del terreno ALOS PALSAR	1	1	0.99907	0.99883	0.99962	0.99925	0.99941	0.99917	0.99981	0.99918	0.99943	0.99920	0.99958	0.99941	1	0.99969	0.99892	0.99912
	2	0.99907	1	0.99962	0.99942	0.99982	0.99931	0.99893	0.99915	0.99979	0.99960	0.99959	0.99938	0.99931	0.99907	0.99928	0.99964	0.99968
	3	0.99883	0.99962	1	0.99912	0.99961	0.99938	0.99914	0.99896	0.99940	0.99946	0.99919	0.99927	0.99938	0.99883	0.99909	0.99983	0.99975
	4	0.99962	0.99942	0.99912	1	0.99954	0.99928	0.99891	0.99953	0.99956	0.99959	0.99961	0.99946	0.99928	0.99962	0.99952	0.99923	0.99937
	5	0.99925	0.99982	0.99961	0.99954	1	0.99949	0.99913	0.99934	0.99966	0.99979	0.99947	0.99958	0.99949	0.99925	0.99945	0.99969	0.99982
	6	0.99941	0.99931	0.99938	0.99928	0.99949	1	0.99966	0.99958	0.99914	0.99967	0.99897	0.99982	1.00000	0.99941	0.99964	0.99942	0.99960
	7	0.99917	0.99893	0.99914	0.99891	0.99913	0.99966	1	0.99938	0.99875	0.99931	0.99858	0.99949	0.99966	0.99917	0.99933	0.99909	0.99928
	8	0.99981	0.99915	0.99896	0.99953	0.99934	0.99958	0.99938	1	0.99919	0.99954	0.99913	0.99972	0.99958	0.99981	0.99982	0.99903	0.99924
	9	0.99918	0.99979	0.99940	0.99956	0.99966	0.99914	0.99875	0.99919	1	0.99948	0.99981	0.99927	0.99914	0.99918	0.99929	0.99945	0.99948
	10	0.99943	0.99960	0.99946	0.99959	0.99979	0.99967	0.99931	0.99954	0.99948	1	0.99932	0.99979	0.99967	0.99943	0.99965	0.99954	0.99971
	11	0.99920	0.99959	0.99919	0.99961	0.99947	0.99897	0.99858	0.99913	0.99981	0.99932	1	0.99914	0.99897	0.99920	0.99920	0.99927	0.99928
	12	0.99958	0.99938	0.99927	0.99946	0.99958	0.99982	0.99949	0.99972	0.99927	0.99979	0.99914	1	0.99982	0.99958	0.99981	0.99934	0.99954
	13	0.99941	0.99931	0.99938	0.99928	0.99949	1	0.99966	0.99958	0.99914	0.99967	0.99897	0.99982	1	0.99941	0.99964	0.99942	0.99960
	14	1	0.99907	0.99883	0.99962	0.99925	0.99941	0.99917	0.99981	0.99918	0.99943	0.99920	0.99958	0.99941	1	0.99969	0.99892	0.99912
	15	0.99969	0.99928	0.99909	0.99952	0.99945	0.99964	0.99933	0.99982	0.99929	0.99965	0.99920	0.99981	0.99964	0.99969	1	0.99926	0.99936
	16	0.99892	0.99964	0.99983	0.99923	0.99969	0.99942	0.99909	0.99903	0.99945	0.99954	0.99927	0.99934	0.99942	0.99892	0.99926	1	0.99983
	17	0.99912	0.99968	0.99975	0.99937	0.99982	0.99960	0.99928	0.99924	0.99948	0.99971	0.99928	0.99954	0.99960	0.99912	0.99936	0.99983	1

Fuente: Elaboración propia

De la anterior matriz de correlación se puede encontrar el valor más alto del promedio del coeficiente de correlación del modelo digital del terreno ALOS PALSAR consigo mismo y con el resto de los 17 disponibles. Es así que el modelo digital del terreno ALOS PALSAR AP_16075_FBS_F6750_RT1.tif representa el modelo digital del terreno que en promedio mejor se

correlaciona con el resto de los modelos digitales del terreno y consigo mismo.

Luego de haber seleccionado todos los modelos digitales del terreno, se procedió a realizar la delimitación de las cuencas y la determinación de los parámetros morfométricos mediante el empleo del software HEC-HMS.

La matriz de correlación de los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR han permitido seleccionar el modelo digital del terreno que mejor se correlaciona con el resto de modelos digitales del terreno ALOS PALSAR disponibles en la zona de estudio de la Cuenca Pedagógica Yesera. A continuación, analizamos estadísticamente cada una de los mejores coeficientes de correlación de los modelos digitales de terreno ALOS PALSAR:

Tabla 5. Análisis estadístico de la matriz de correlación de los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR

		Coeficiente de correlación		
		Promedio	Mínimo	Desviación estándar
Código del modelo digital del terreno ALOS PALSAR	1	0.999394	0.998830	0.000350
	2	0.999451	0.998930	0.000300
	3	0.999345	0.998830	0.000341
	4	0.999451	0.998910	0.000244
	5	0.999552	0.999130	0.000233
	6	0.999516	0.998970	0.000276
	7	0.999234	0.998580	0.000350
	8	0.999459	0.998960	0.000312
	9	0.999398	0.998750	0.000308
	10	0.999587	0.999310	0.000179
	11	0.999290	0.998580	0.000335
	12	0.999564	0.999140	0.000239
	13	0.999516	0.998970	0.000276
	14	0.999394	0.998830	0.000350
	15	0.999513	0.999090	0.000255
	16	0.999405	0.998920	0.000322
	17	0.999516	0.999120	0.000263

Fuente: Elaboración propia

En la anterior tabla se puede observar que los máximos coeficientes de correlación se agrupan alrededor del modelo digital del terreno ALOS PALSAR con Código 10, según la codificación presentada en la Tabla 2, y que corresponde al modelo digital del terreno ALOS PALSAR AP_16075_FBS_F6750_RT1.tif, que además establece una correlación mínima igual a 0.999310 correspondiente con el Código 7 que representa el mayor valor de los registrados en la Tabla 6, y consiguientemente la menor desviación estándar

de los coeficientes de correlación entre modelos digitales del terreno. Este criterio se asume para seleccionar el modelo digital del terreno ALOS PALSAR, es decir, el que tiene una mayor correlación promedio con cada uno de los restantes modelos digitales del terreno ALOS PALSAR.

Se observa en la anterior tabla que los mayores valores de los coeficientes de correlación resaltados en color verde, no tienen una relación preferencial con un modelo digital del terreno ALOS PARSAL en particular, pues la máxima correlación es aleatoria entre los modelos disponibles. La siguiente tabla ilustra la relación aleatoria entre modelos ALOS PALSAR que tienen el máximo coeficiente de correlación.

Tabla 6. Relación entre modelos digitales del terreno ALOS PALSAR que exponen el máximo coeficiente de correlación

Código	Código máxima correlación ALOS PALSAR	
1	14	
2	5	
3	16	
4	1	14
5	2	17
6	13	
7	6	13
8	15	
9	11	
10	5	12
11	9	
12	6	13
13	6	
14	1	
15	8	
16	3	17
17	16	

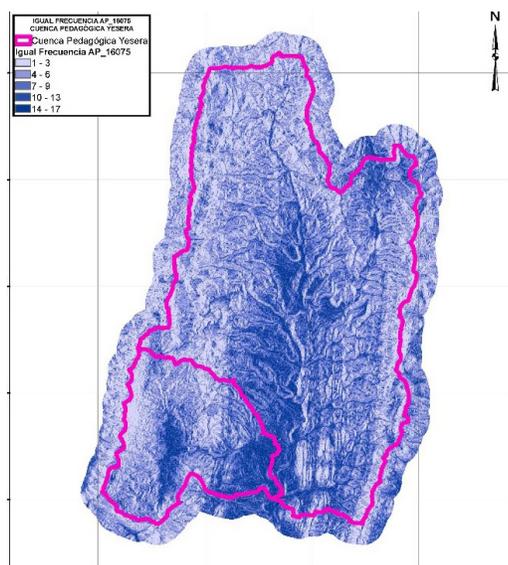
Fuente: Elaboración propia

La anterior tabla permite afianzar el criterio expuesto para seleccionar el modelo digital del terreno que tiene el mayor coeficiente de correlación en promedio, pues al ser un dato de carácter aleatorio, la eva-

luación geoestadística nos permitirá seleccionar un modelo digital del terreno ALOS PALSAR con mejor correlación respecto de todos los disponibles para su evaluación.

Una vez seleccionado el modelo digital del terreno ALOS PALSAR AP_16075_FBS_F6750_RT1.tif, se ha analizado su representatividad, considerando el geoestadístico igual frecuencia de los modelos digitales ALOS PALSAR respecto del seleccionado. La figura siguiente representa este aspecto espacial relevante para la presente investigación:

Figura 9: Igual frecuencia de elevación en modelos digitales del terreno ALOS PALSAR Cuenca Pedagógica Yesera



Fuente: Elaboración propia

Los geoestadísticos del modelo digital del terreno ALOS PALSAR AP_16075_FBS_F6750_RT1.tif, demuestran que tiene en promedio 6 frecuencias iguales de elevación respecto de las del resto de los modelos digitales ALOS PALSAR con una desviación estándar igual a 3.7. Tales geoestadísticos pueden representar indicadores al evaluar el resto de los modelos digitales del terreno ALOS PALSAR.

Parámetros morfométricos

Como se expuso anteriormente tanto la delimitación de las cuencas y los parámetros morfométricos correspondientes se han procesado empleando el software HEC-HMS.

La morfometría de los diferentes modelos digitales del terreno analizados, permiten analizar las características respecto del procesamiento para la obtención de un modelo digital de elevaciones corregido para fines hidrológicos empleando las herramientas del software HEC-HMS. La siguiente tabla resume algunas de las características morfométricas de los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente:

Tabla 7. Características morfométricas de los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente

Modelo digital del terreno	Depresión (m)				Acumulación de flujo
	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	
SRTM	1.7630	1	12	1.2811	238230
ASTER GDEM	2.6729	1	21	2.0910	240162
ALOS PALSAR	1.7044	1	14	1.1829	238230

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la anterior tabla que los valores de las depresiones que se rellenaron para corregir hidrológicamente el modelo digital de elevación tienen valores mayores en el caso del modelo ASTER GDEM,

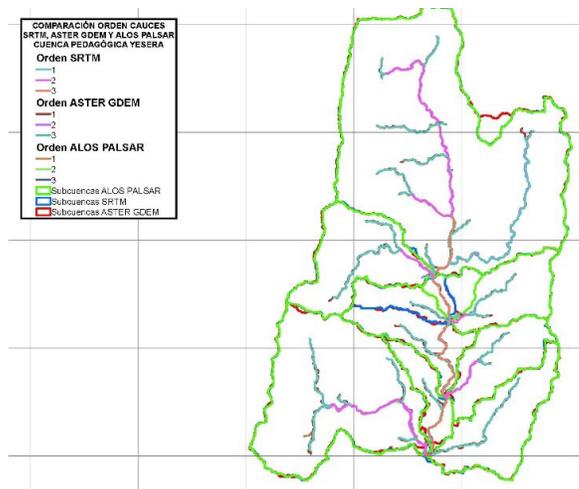
mientras que en el caso de SRTM y ALOS PALSAR presentan valores similares.

Se ha realizado una inspección visual de las delimitaciones de las cuencas realizadas mediante la

aplicación del software HEC-HMS y empleando cada uno de los modelos digitales del terreno, SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR, respectivamente. Los mapas se presentan a continuación, y se observan diferencias sustanciales de los mismos, la valoración de cada una de las zonas, luego de realizar la inspección visual nos demuestra que la mejor delimitación es lograda a través del empleo del modelo digital ALOS PALSAR, principalmente al contrastar la delimitación la imagen satelital correspondiente con la zona de investigación.

Asimismo, también se ha realizado una comparación visual de la red de drenaje, obtenida mediante la aplicación del software HEC-HMS, si bien expone ciertas diferencias respecto del empleo de alguno de los modelos digitales del terreno SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR, no es tan significativa como la diferencia en las delimitaciones. A continuación, se observa la red de drenaje de cada uno de los modelos digitales del terreno procesados y corregidos hidrológicamente con el software HEC-HMS.

Figura 10: Comparación delimitación cuenca y red de drenaje con diversos DEMs de la Cuenca Pedagógica Yesera



Fuente: Elaboración propia

Se han determinado varios parámetros morfométricos en cada una de las subcuencas y sus redes de drenaje asociadas, y se han agrupado en las tablas que se presentan a continuación:

Tabla 8. Área de las subcuencas según los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente

Código Subcuenca	Área (km ²)			Estadísticos	
	ALOS PASLAR	ASTER GDEM	SRTM	Promedio	Desviación estándar
1	89.077	90.611	88.995	89.561	0.910
2	12.157	12.221	12.108	12.162	0.057
3	16.132	16.421	16.219	16.257	0.148
4	14.393	9.513	9.506	11.137	2.819
5	10.941	13.223	13.265	12.476	1.330
6	6.101	5.956	6.101	6.053	0.084
7	18.243	18.506	18.374	18.374	0.132
8	3.935	6.564	6.432	5.644	1.481
9	41.917	41.549	41.936	41.801	0.218

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Densidad de drenaje de las subcuencas según los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente
Fuente:

Código Subcuenca	Densidad de drenaje (km/km ²)			Estadísticos	
	ALOS PALSAR	ASTER GDEM	SRTM	Promedio	Desviación estándar
1	0.499	0.495	0.497	0.497	0.002
2	0.462	0.466	0.468	0.465	0.003
3	0.448	0.472	0.448	0.456	0.014
4	0.717	0.852	0.813	0.794	0.069
5	0.520	0.454	0.473	0.483	0.034
6	0.838	0.841	0.821	0.833	0.011
7	0.592	0.602	0.597	0.597	0.005
8	0.785	0.742	0.745	0.757	0.024
9	0.469	0.448	0.450	0.456	0.012

Elaboración propia

Tabla 10. Pendiente de las subcuencas según los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente Fuente:

Código Subcuenca	Pendiente de la cuenca (m/m)			Estadísticos	
	ALOS PALSAR	ASTER GDEM	SRTM	Promedio	Desviación estándar
1	0.327	0.343	0.325	0.332	0.010
2	0.262	0.288	0.257	0.269	0.017
3	0.262	0.279	0.256	0.266	0.012
4	0.214	0.225	0.209	0.216	0.008
5	0.307	0.299	0.277	0.294	0.016
6	0.132	0.153	0.126	0.137	0.014
7	0.382	0.387	0.381	0.384	0.003
8	0.172	0.220	0.208	0.200	0.025
9	0.258	0.276	0.255	0.263	0.011

Elaboración propia

Tabla 11. Relieve de las subcuencas según los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente

Código Subcuenca	Relieve de la cuenca (m)			Estadísticos	
	ALOS PALSAR	ASTER GDEM	SRTM	Promedio	Desviación estándar
1	1089	1085	1088	1087.333	2.082
2	588	592	587	589.000	2.646
3	628	638	625	630.333	6.807
4	798	791	797	795.333	3.786
5	610	608	609	609.000	1.000
6	263	260	258	260.333	2.517
7	868	868	866	867.333	1.155
8	162	617	600	459.667	257.927
9	837	822	836	831.667	8.386

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Red de drenaje de cuencas según los modelos digitales del terreno corregidos hidrológicamente

Orden Schum	SRTM		ASTER GDEM		ALOS PALSAR	
	Cantidad tramos	Longitud tramos (km)	Cantidad tramos	Longitud tramos (km)	Cantidad tramos	Longitud tramos (km)
1	29	68.593	30	58.820	29	67.522
2	15	27.200	17	37.902	15	29.310
3	13	15.196	12	15.438	13	15.265
		110.988		112.159		112.097

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los valores de los parámetros morfométricos difieren en las subcuencas código 5 principalmente, debido a que, en la delimitación de tal subcuenca, existe una zona que en los modelos digitales del terreno SRTM y ASTER GDEM no es representada adecuadamente en relación al modelo ALOS PALSAR, apreciación realizada en la inspección visual de las delimitaciones obtenidas. Cada uno de los parámetros morfométricos determinados, difieren para cada una de los modelos digitales de terreno empleados, entre los que difieren sensiblemente son la pendiente de la cuenca, el relieve de la cuenca y la densidad de drenaje, en el caso del área de las subcuencas únicamente en 2 zonas, en la parte central de la cuenca y el sector al norte de la misma.

En el caso de la red de drenaje, las diferencias son evidentes al comparar los valores de los modelos digitales de terreno ALOS PALSAR y SRTM respecto de ASTER GDEM, pues los 2 primeros poseen valores similares.

La presente investigación nos conduce a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Para cada zona de estudio existen modelos digitales del terreno disponibles de diferentes características, entre los cuales se pueden emplear SRTM, ASTER GDEM y ALOS PALSAR. La elección de uno de ellos es importante para desarrollar el análisis hidrológico adecuado, principalmente orientando los esfuerzos en la delimitación de la cuenca hidrográfica y red de drenaje de una manera adecuada, que permi-

ta la determinación correcta de los parámetros morfométricos.

- En el caso de los modelos digitales del terreno SRTM y ASTER GDEM, existe un solo registro para cada ubicación espacial, mientras que el modelo digital ALOS PALSAR tiene una diversidad de registros disponibles en función a la órbita satelital en la cual fue capturada la información. La elección de uno de ellos es necesaria para obtener valores únicos de los parámetros morfométricos de una cuenca.
- La selección de un modelo digital del terreno ALOS PALSAR se plantea como un procedimiento en este trabajo de investigación, considerando el mejor coeficiente de correlación de los valores de elevación registrados en las celdas de las fechas diferentes fechas analizadas. Se adopta como criterio que tanto las órbitas satelitales ascendentes como descendentes de los modelos digitales ALOS PALSAR, al emplear el modelo digital del terreno que tiene mayor coeficiente de correlación promedio con el resto de modelos, su representación del terreno se acerca a la que probablemente sea la más adecuada para su empleo en la delimitación de la cuenca y la red de drenaje, para determinar mejores parámetros morfométricos.
- El modelo digital ALOS PALSAR ha demostrado que tiene mejor desempeño para representar espacialmente la cuenca y de la red de drenaje, luego de la comparación visual realizada de las

delimitaciones a nivel subcuenca y de la red de drenaje que produce el software HEC-HMS, y la observación de similitudes de las delimitaciones con las observadas en imágenes satelitales históricas disponibles.

- Los parámetros morfométricos difieren sustancialmente al emplear diversos modelos digitales del terreno, siendo los más similares los obtenidos mediante a través de SRTM y ALOS PALSAR.
- Existe la necesidad de realizar una investigación futura considerando las órbitas ascendentes y descendentes por separado, y analizar las ventajas que considera tal enfoque en el proceso de selección del mejor modelo digital del terreno ALOS PALSAR.
- En una siguiente fase de investigación, brindando continuidad a la actual, se propone emplear los datos del sitio web <https://openaltimetry.org/data/icesat2/>, para realizar una validación del uso del Modelo Digital del Terreno, considerando que los registros tienen analogía con la obtención de puntos de control en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- 🔖 JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency, 2008. ALOS Data Users Handbook. Revisión C ed. Japón: Earth Observation Research and Application Center.
- 🔖 Alahmadi, F. S., 2018. Evaluation of global digital elevation model ALOS/PALSAR using aerial LiDAR. [En línea]
- 🔖 Available at: https://www.researchgate.net/publication/332242489_Evaluation_of_global_digital_elevation_model_ALOSPALSAR_using_aerial_LiDAR
- 🔖 ALOS PALSAR NASA, 2022. Advanced Land Observing Satellite-1 (ALOS) Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR). [En línea]
- 🔖 Available at: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>
- 🔖 Alves Ferreira, Z. & Cabral, P., 2022. A Comparative Study about Vertical Accuracy of Four Freely Available Digital Elevation Models: A Case Study in the Balsas River Watershed, Brazil. ISPRS - International Journal of Geo-Information, 11(<https://doi.org/10.3390/ijgi11020106>), pp. 1-14.
- 🔖 ArcGeek, 2018. ArcGeek - Franz Pucha Cofrep. [En línea]
- 🔖 Available at: <https://acolita.com/diferencias-dsm-dem-dtm/>
- 🔖 Ashutosh, B., Kamal, J. & Rajat S., C., 2019. Generation of high-quality digital elevation models by assimilation of remote sensing-based DEMs. Journal of Applied Remote Sensing, 13(4), pp. 044502-1/044502-19.
- 🔖 ASTER GDEM NASA, 2012. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Map (GDEM) NASA. [En línea]
- 🔖 Available at: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- 🔖 Atriyon, J., 2015. Height Model Integration Using ALOS PALSAR, X SAR, SRTM C, and ICESAT/GLAS. International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences, 12(2), pp. 107-116.
- 🔖 Bakiev, M. & Khasanov, K., 2021. Comparison of Digital Elevation Models for Determining the Area and Volume of the Water Reservoir. International Journal of Geoinformatics, 17(1), pp. 37-45.
- 🔖 Benjamin, P. & Bodo, B., 2017. Validation of digital elevation models (DEMs) and comparison of geomorphic metrics on the southern Central Andean Plateau. Earth Surface Dynamics, 5(2), pp. 211-237.

- Blanco, P., Arbiol, R. & Pala, V., 2008. Astrophysics Data System. [En línea]
- Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008ESASP.664E..81B/abstract>
- Comert, R., 2021. Investigation of the Effect of the Dataset Size and Type in the Earthquake-Triggered Landslides Mapping: A Case Study for the 2018 Hokkaido Iburu Landslides. *Frontiers on Earth Science*, 25 Febrero, 9(Article 633665), pp. 1-11.
- Cristian, G. O. y otros, 2019. Analysis and Correction of Digital Elevation Models for Plain Areas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 85(3), pp. 209-219.
- Earth Data Search NASA, 2022. Earth Data Search. [En línea]
- Available at: <https://search.earthdata.nasa.gov/search/>
- Ferreira-Ferreira, J. y otros, 2014. Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamiraua Sustainable Development Reserve, Central Amazon floodplain, Brazil. *Journal Wetlands Ecology and Management*.
- HEC Hydrologic Engineering Center, 2021. HEC-HMS Users Manual. [En línea]
- Available at: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.8/geographic-information/basin-characteristics>
- Jamal Jalal, S. y otros, 2020. Science Direct. [En línea]
- Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674984720300562?via%3DiHub>
- Johanna, N. N. & Jianping, C., 2018. The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The lishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Issue 21, pp. 57-67.
- Julzarika, A. J., Aditya, T. & Subaryono, S., 2021. Vertical Accuracy Evaluation of Digital Terrain Model (DTM) ALOS PALSAR-2 in Rote Dead Sea Area – Indonesia. *Geodetstki List - Pregledni znanstveni članak*, 1(ISSN 1849-0611 (Online), UDK 528.4:528.716.2:528.915:004.92(594)), pp. 9-28.
- Khasanov, K. & Ahmedov, A., 2021. Comparison of Digital Elevation Models for the designing water reservoirs: a case study Pskom water reservoir. *E3S Web of Conferences - CONMECHYDRO - 2021*, p. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202126403058>.
- Mahdavi, S. y otros, 2017. IGTF 2017 - Imaging & Geospatial Technology Forum 2017. [En línea]
- Available at: https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/IGTF2017/Mahdavi_209.pdf
- Maryam, K. y otros, 2020. Evaluation of open Digital Elevation Models: estimation of topographic indices relevant to erosion risk in the Wadi M'Goun watershed, Morocco. *AIMS Geosciences*, 6(2), pp. 231-257.
- MMAyA Miniterio de Medio Ambiente y Agua, 2009. Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas de Bolivia - Metodología Pfafstetter, La Paz, Bolivia: Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.
- MOPSV - Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, 2020. Guía Boliviana de Diseño Sísmico de Bolivia. 1 ed. La Paz: SIB - Sociedad de Ingenieros de Bolivia.

- 🔖 NASA - National Aeronautics and Space Administration, 2022. Earth Data Search. [En línea]
- 🔖 Available at: <https://search.earthdata.nasa.gov/>
- 🔖 Papasaika-Hanusch, C., 2012. Fusion of Digital Elevation Models. Zurich: ETH ZURICH Institute of Geodesy and Photogrammetry.
- 🔖 Rodrigues, T. G., Paradella, W. R. & Oliveira, C. G., 2011. Evaluation of the altimetry from SRTM-3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon Region. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, Volumen Online version ISSN 1678-2690, pp. 953-966.
- 🔖 SRTM NASA, 2022. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). [En línea]
- 🔖 Available at: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- 🔖 UNESCO, 2021. Global Maps of Land Subsidence susceptibility. [En línea]
- 🔖 Available at: <https://www.landsubsidence-unesco.org/maps/>
- 🔖 Yu, J. H. & Ge, L., 2010. Digital Elevation Model generation using ascending and Descending multi-baseline ALOS/PALSAR radar images. XXIV FIG International Congress and Australian surveyors, 1(24), pp. 1 -15.
- 🔖 Zhao, C. y otros, 2013. Pre-, co-, and post- rockslide analysis with ALOS/PALSAR imagery: a case study of the Jiweishan rockslide, China. Natural Hazards and Earth System Sciences, 1(doi:10.5194/nhess-13-2851-2013), pp. 2851-2861.