

Aproximación a la evaluación de la exactitud temática de la cartografía geomorfológica

Approach to the evaluation of the thematic accuracy of geomorphological mapping

Pedro Karin Serrato Álvarez¹

Victoria Daniela Camacho²

Patricia Escudero Montañez³

Yesenia Vargas Tejedor⁴

Angie Lorena Avendaño⁵

Carlos Andrés Franco Prieto⁶

Recibido 21 de febrero de 2021; aceptado 11 de junio de 2021

RESUMEN

La evaluación de la exactitud temática (EETM), en la cartografía temática, constituye un indicador de confiabilidad del producto generado mediante el reconocimiento del medio biofísico. Sin embargo, aunque existen varias investigaciones y desarrollos alrededor de la EETM, especialmente orientadas a la cartografía de cobertura y uso de la tierra, existen otros tópicos como la geomorfología que requiere profundizar en este tipo de valoración. En esta investigación, se desarrolló una propuesta metodológica para la EETM de la cartografía geomorfológica, que comprendió dos componentes generales

¹ Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: pkerrat@igac.gov.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2437-183X>

² Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: victoria.kiki1987@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4239-8646>

³ Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: pescuderm@unal.edu.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3284-6660>

⁴ Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: yesenia.vargas@igac.gov.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4504-4555>

⁵ Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: angie.avendano@igac.gov.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0791-0456>

⁶ Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: carlos.franco@igac.gov.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3748-0592>

temático y estadístico, que incluyeron varios procesos como la revisión y selección de insumos de sensores remotos y cartografía temática a escala 1:25 000, la activación del ambiente de control de calidad para la capa de geomorfología, la realización del diseño de muestreo estadístico, la verificación de la exactitud temática, y la generación y análisis de una matriz de confusión. Los resultados obtenidos en esta iniciativa brindan una alternativa para realizar la verificación temática de los productos que se generen con base en variables estadísticas y proporciona una métrica de la confiabilidad de los mapas geomorfológicos que garantice a los usuarios finales (internos y externos) su calidad y usabilidad, así mismo facilita los procesos de verificación de la cartografía geomorfológica.

Palabras clave: *cartografía, exactitud temática, geomorfología, métricas de calidad.*

ABSTRACT

The thematic accuracy assessment (EETM), in thematic mapping, constitutes an indicator of the reliability of the product generated by recognizing the biophysical environment. However, although there are several investigations and developments around the EETM, especially oriented to the cartography of coverage and land use, there are other topics such as geomorphology that requires a deeper analysis of this type of assessment. In this research, a methodological proposal for the EETM of geomorphological cartography was developed, which comprised two general components Thematic and Statistical, which included several processes such as the review and selection of inputs from remote sensors. and thematic mapping at 1: 25 000 scale, the activation of the quality control environment for the geomorphology layer, the performance of the statistical sampling design, the verification of thematic accuracy, and the generation and analysis of a matrix of confusion. The results obtained in this initiative provide an alternative to carry out the thematic verification of the products that are generated based on statistical variables and provide a metric of the reliability of the geomorphological maps that guarantees the end users (internal and external) their quality and usability, it also facilitates the verification processes of geomorphological cartography.

Key words: *cartography, thematic accuracy, geomorphology, quality metrics.*

1. Introducción

La evaluación de la calidad de productos geomorfológicos de esta propuesta, contribuye en la generación de pautas para la realización óptima de la evaluación de la exactitud temática, en cuanto a su precisión en el análisis de la incertidumbre en las delineaciones y la precisión de la asignación precisa de las geoformas, con un método eficiente que reduce el tiempo y dinero en su validación. Esto es de gran importancia, si se tiene en cuenta que los mapas geomorfológicos son productos científicos que sirven como insumo en los levantamientos de suelos, además de la gestión de riesgos naturales y la

planificación del territorio. Asimismo, expone las principales dificultades que se presentan en el proceso de control de calidad y cómo la presente investigación toma estos como punto de partida para contribuir a mejorar los procesos y atender las necesidades en esta temática.

La importancia de la geomorfología radica en que es uno de los insumos fundamentales que hace parte de las etapas de los estudios de levantamientos de suelos que se realizan a nivel mundial. De forma general, el proceso de interpretación geomorfológica conlleva la delimitación de unidades visibles en las imágenes satelitales y fotografías aéreas en forma de polígonos, la asignación temática de estos según un nivel jerárquico ligado a la escala del estudio. En ese sentido, en la metodología de análisis geomorfológico de Zinck (1987), que se trabajó aquí, tiene un nivel categórico de mayor generalización en el paisaje geomorfológico, incluyendo luego el ambiente morfogenético, el tipo de relieve y el material geológico o sustrato, hasta llegar a la categoría de mayor detalle que es la forma de terreno. Como parte del proceso también se realiza el control de calidad de esta capa.

De acuerdo con estos elementos, es necesario definir una metodología de evaluación de exactitud temática que facilite y agilice los procesos de validación. Para lograr esto, se requiere tener en cuenta las particularidades de esta temática con el fin de definir un diseño de muestreo apropiado que proporcione métricas estadísticas y de confiabilidad de los mapas geomorfológicos y que posibilite a los usuarios internos y externos a nivel nacional e internacional valorar su ajuste con la realidad y así considerar el tipo de decisiones a tomar de acuerdo con la información cartográfica suministrada (Mas *et al.*, 2003).

En este orden de ideas, se definieron dentro de los objetivos: diseñar un método de muestreo estadístico óptimo para la evaluación de la exactitud temática de la cartografía geomorfológica de un área piloto, realizar la validación temática a partir de puntos de muestreo y analizar su exactitud con base en una matriz de error, para finalmente estructurar una propuesta metodológica que apoye los procesos de validación de la cartografía de esta temática a escala 1:25 000.

La evaluación de la exactitud o confiabilidad temática (EETM) está directamente relacionada con la calidad del dato geográfico que se encuentra definida bajo la Norma Técnica Colombia NTC 5043 como el conjunto de características de los datos geográficos que describen su capacidad para satisfacer necesidades establecidas e implícitas. En este sentido, también se define la exactitud como la cercanía que presentan los valores de las observaciones realizadas, con relación a los valores reales o a los valores aceptados como verdaderos y al indicador de calidad de los datos como el tipo de prueba aplicada a un nivel de medición específico para evaluar la calidad de los datos geográficos.

Por lo anterior la EETM, en este caso la información espacial geomorfológica, hace parte de los insumos que deben aportar un buen grado de confiabilidad en su caracterización para realizar mapas de suelos y asimismo, optimizar los procesos de control de calidad en los diferentes procesos que hacen uso de

esta cartografía generada por las entidades o institutos geográficos o de suelos a nivel mundial.

Con respecto a la evaluación de la confiabilidad temática (EET), esta se basa en un muestreo de sitios de verificación, cuya clasificación se obtiene a partir de observaciones de campo o del análisis de imágenes de satélite y fotos aéreas más detalladas, que aquellas utilizadas para generar el mapa preliminar (Peralta-Higuera *et al.*, 2001). En este sentido, la evaluación de la confiabilidad temática consiste en comparar la información del mapa con información de referencia considerada muy confiable, basándose en sitios de muestreo, cuya clasificación se obtiene a partir del análisis de imágenes. Durante el proceso es ideal que las personas que evalúen el mapa no hayan formado parte del proceso de la elaboración de éste (IGN, 2009).

Por otra parte, con respecto al análisis de los datos de confiabilidad, este se realiza mediante una matriz de confusión, que posibilita confrontar la información de sitios de verificación con aquella de la base cartográfica que se pretende evaluar. Además, facilita no solo conocer el grado global de acierto, sino también las categorías en las que se producen tales confusiones. Los valores de error pueden utilizarse para corregir las estimaciones de superficie asignadas a cada unidad geomorfológica. Para comparar los resultados de la evaluación de dos mapas se puede realizar, por ejemplo, los índices de kappa, o la normalización de la matriz de confusión de acuerdo con sus particularidades (Chuvieco, 2008).

Además, Mas *et al.* (2003) coinciden en que previo a su utilización para la toma de decisiones, la cartografía temática debe ser evaluada para conocer su confiabilidad. Asimismo revela que toda base de datos geográfica presenta un grado de incertidumbre que depende, principalmente, de la calidad de los insumos y de la metodología adoptada para su elaboración. Lo anterior obedece a que existen dos tipos de error en la cartografía (Chrisman, 1989; Goodchild *et al.*, 1992; Janssen y Vanderwel, 1994; Pontius, 2000 y 2002; Carmel *et al.*, 2001), los cuales se resumen así: los errores temáticos, que se refieren a errores de atributo (etiqueta), y los errores geométricos (de posición) que ocurren en la delimitación de los polígonos (unidades delimitadas en la interpretación).

Los autores antes citados también hacen referencia a que uno de los procesos utilizados en la evaluación de confiabilidad se basa en el diseño e implementación de muestreo de sitios de verificación, cuya clasificación se obtiene a partir de observaciones de campo o del análisis de imágenes más detalladas (con mejor resolución espacial), que aquellas utilizadas para generar el mapa.

Finalmente, la revisión realizada por Mas *et al.* (2003) sugieren que el proceso de evaluación de la confiabilidad temática se divide en tres etapas: a) El diseño del muestreo; b) la evaluación del sitio de verificación, que posibilita obtener la clase correspondiente a cada unidad de muestreo y c) el análisis de los datos, que consiste generalmente en la elaboración de una matriz de confusión y el cálculo de métricas de confiabilidad (Stehman y Czaplewski, 1998).

2. Área de estudio

Para el desarrollo de este proyecto se definió un área piloto ubicada en el municipio de Mocoa, departamento de Putumayo en Colombia, con un cubrimiento de 36 km² (Figura 1). Es un municipio caracterizado fisiográficamente por estar ubicado en el “piedemonte de la cordillera andina, en la cuenca alta del Río Mocoa y el Río Cascabel. La temperatura promedio es de 24.0 °C y su elevación oscila entre 2 000 y 3 200 metros” (Alcaldía de Mocoa, 2020).

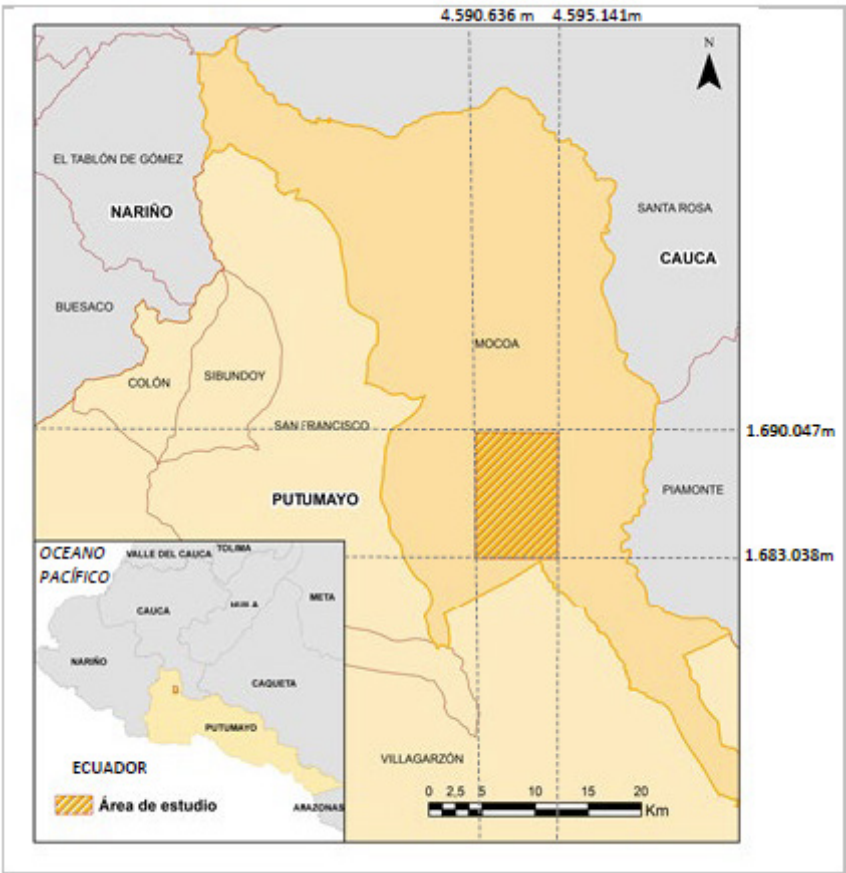


Figura 1. Localización área de estudio (Coordenadas -ESPG: 9377).

3. Metodología

El desarrollo metodológico del proyecto comprendió las siguientes actividades principales: a) Definición de un área piloto; b) revisión y selección de insumos; c)

activación del ambiente de control de calidad para geomorfología; d) diseño de muestreo, y e) generación de la Matriz de confusión. En la Figura 2 se presenta la metodología general.

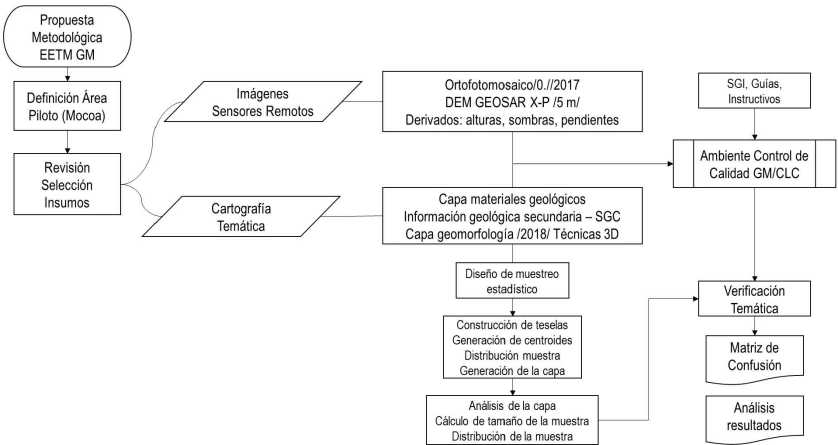


Figura 2. Flujo del proceso metodológico realizado.

3.1. Materiales

Los insumos empleados para el desarrollo del proyecto consisten en un ortofotomosaico, cartografía temática, modelos digitales de elevación (DEM), memorias técnicas, entre otros. A continuación, se describen estos elementos.

3.1.1. Imágenes de sensores remotos

Imágenes de satélite

Específicamente dos imágenes ortorrectificadas de la constelación Planet Scope (2017), que presentan las siguientes características.

- Ortofotomosaico. Es un insumo generado por el Instituto Geográfico de Colombia a partir de las fotografías aéreas. Se caracteriza por ser de Nivel 2 (Convencional) y tomado mediante el sensor ADS 80. En la Tabla 1 se presenta la descripción de este elemento.

Es importante destacar que el ortofotomosaico cubre únicamente un 29% del área de estudio. Además, no fue este el insumo (imagen) sobre la cual se generó la interpretación de la capa. No obstante, sus características dan cuenta de una mejora en la resolución espacial del insumo. (Tabla 2).

Tabla 1. Características ortofotomosaico

<i>Sensor</i>	<i>Tipo</i>	<i>Resolución espectral</i>	<i>Resolución radiométrica</i>	<i>Resolución espacial</i>
Planet Scope	Multiespectral	4 Bandas	16 Bits	3 m

Fuente: Colombia en Mapas (IGAC, 2021).

Tabla 2. Características ortofotomosaico

<i>Sensor</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>	<i>Escala</i>	<i>Vuelo</i>	<i>Fotografías</i>	<i>Fecha de toma</i>
ADS 80	0,20	1:2.000	1415_170405	195221, 201158, 194546	5 de abril de 2017
			1415_170406	214211, 214751, 220640	6 de abril de 2017

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)..

- Modelos Digitales de Elevación (DEM). El DEM empleado para este proyecto es un producto GeoSAR del año 2009, cuyos datos fueron obtenidos mediante tecnología radar de una plataforma aerotransportada. En la Tabla 3 se presenta las especificaciones del modelo.

Tabla 3. Características Modelo Digital de Elevación

<i>Sistema</i>	<i>Banda</i>	<i>Resolución espacial</i>
GEOSAR	X	3 m
	P	5 m

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

También se utilizó como insumo de apoyo el DEM producto del satélite ALOS (The Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), que adquirió imágenes de radar en el período 2006-2011. (Tabla 4).

Tabla 4. Características Modelo Digital de Elevación

<i>Satélite</i>	<i>Banda</i>	<i>Producto</i>	<i>Resolución espacial</i>
ALOS PALSAR	L	Hi-Res Terrain Corrected	12.5

Fuente: NASA-EOSDIS-ASF/DAAC (2020).

Así mismo, se generaron los productos derivados de pendientes y modelo de pendiente como apoyo en la verificación. Figura 3

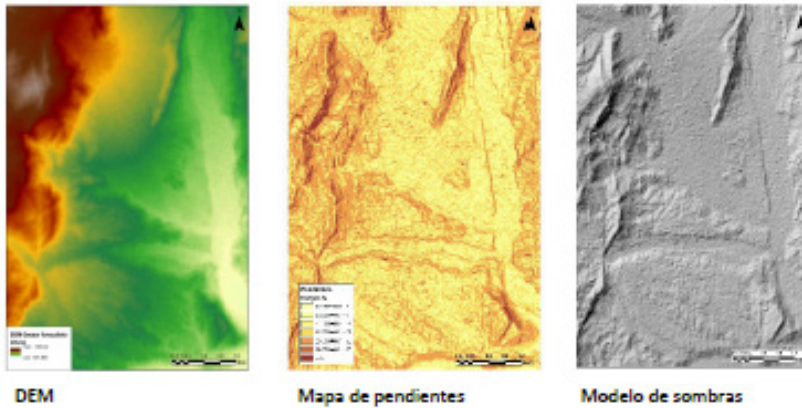


Figura 3. Ejemplos derivados del DEM de apoyo en el proceso.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2018).

3.2.1. Cartografía

Cartografía geomorfológica

Es la capa vectorial con la interpretación de la geomorfología a escala 1:25 000, elaborada el Instituto Geográfico de Colombia (2018). En el mapa de la Figura 4, se ilustra en gamas color verde el ambiente morfogénético Denudacional, Depositional y Estructural y con símbolos la identificación abreviada de las geoformas. Cabe destacar que la caracterización geomorfológica se realizó mediante el uso de técnicas de interpretación digital en 3D de fotografías aéreas disponibles mediante una estación fotogramétrica con el software de procesamiento ERDAS IMAGINE PHOTOGRAMMETRY, adicionalmente se utilizaron insumos de apoyo como imágenes ópticas de sensores remotos, Modelos Digitales de Elevación ALOS y GEOSAR con 12 y cinco metros de resolución espacial respectivamente.

Cartografía materiales geológicos

Es la capa vectorial de materiales geológicos a escala 1:100.000.

Plancha geológica

Corresponde a la plancha geológica No 430 a escala 1:100.000, en formato .img que tiene como fuente INGEOMINAS (2002), entidad que hoy en día se denomina Servicio Geológico Colombiano-SGC.

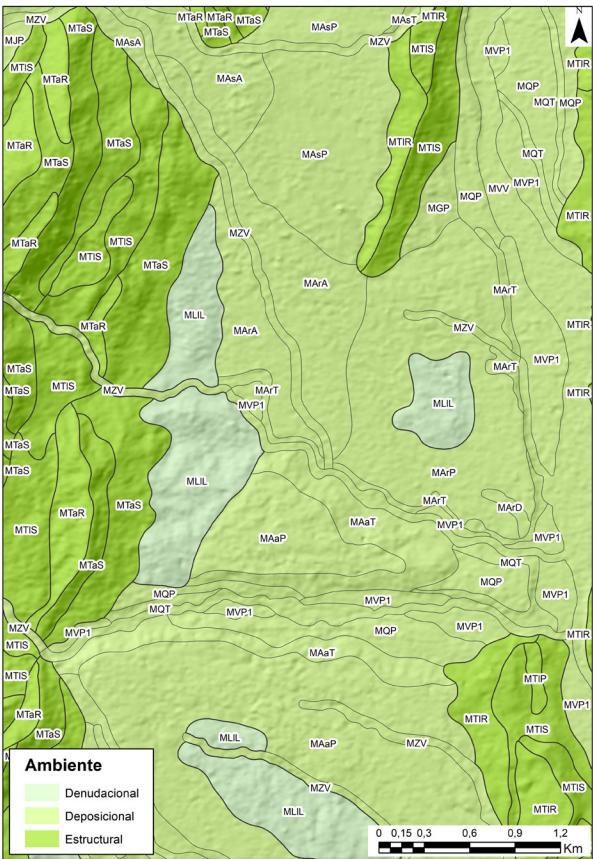


Figura 4. Capa de geomorfología del área de estudio. Insumo para la EETM.
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2018).

3.1.3. Software

Las características de los programas utilizados en la evaluación de la exactitud temática de la cartografía geomorfológica se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Software utilizado

Proceso	Hardware y/o software	Versión
Análisis estadístico de los datos (diseño de muestreo y matriz de confusión)	R y R Studio	4.0.2
Verificación temática de la cartografía	ArcGIS	10.5

3.2. Métodos

3.2.1. Diseño de muestreo estadístico

Una vez evaluados todos los diseños muestrales planteados, se decidió emplear un diseño muestral multietapa (a dos etapas) estratificado y sistemático no alineado. A continuación, se presenta el procedimiento realizado para la capa de geomorfología (Figura 5).

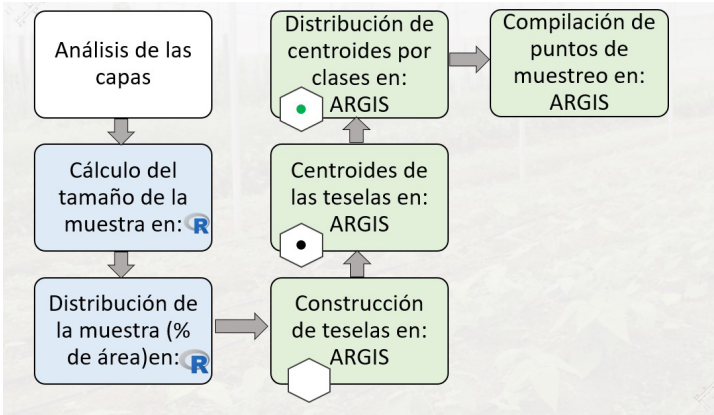


Figura 5. Procedimiento Diseño de muestreo.

La interpretación geomorfológica conlleva la delimitación de polígonos y la asignación temática de estos según un nivel jerárquico ligado a la escala del estudio. En ese sentido, el nivel categórico de mayor generalización es el paisaje, pasando por el ambiente morfogenético, tipo de relieve y el material geológico, hasta llegar a la categoría con mayor detalle que es la forma de terreno.

En este estudio, las unidades primarias de muestreo (UPM) definen las clases de geoformas, las que están determinadas por los atributos de forma del terreno y tipo de relieve (niveles categóricos de mayor detalle). Logrando así varias clases temáticas, las que aparecen en la Tabla 6.

La definición de las geoformas está ligada a las características de paisaje del área de estudio. Las condiciones particulares del municipio de Mocoa hacen que allí se manifiesten las clases descritas en la leyenda del mapa. No obstante, es de esperarse que estas condiciones cambien en otras zonas del país.

Como unidades secundarias de muestreo (USM), se eligieron teselas. En efecto, el territorio de estudio se dividió en una rejilla, en la que cada componente de esta presenta una forma hexagonal. El punto de muestra no se tomó necesariamente en el punto central de la tesela, esto dada la forma y distribución espacial de los polígonos de muestreo (Figura 6).

Tabla 6. Unidades geomorfológicas evaluadas a nivel de forma del terreno con su tipo de relieve precedente

<i>Tipo de relieve</i>	<i>Forma del terreno</i>
Abanico aluvial reciente	cuerpo
	ápice
	bajo
	talud
Abanico aluvial sub reciente	ápice
	cuerpo
Valle estrecho	plano de terraza 1
Vallecito	vega
Abanico terraza	cuerpo
Loma	ladera
Crestón	revés
	frente
	resalto
Glacis de acumulación	cuerpo
Abanico aluvial antiguo	talud
	cuerpo



Figura 6. Teselas que incluyen los puntos de muestreo para la validación temática de la capa de geomorfología en la zona de estudio.

Una vez establecidos los diseños muestrales para la capa de geomorfología, se debió plantear la pregunta: ¿qué tamaño de muestra se necesitaba? Entonces se respondió teniendo en cuenta que el objetivo principal de un diseño muestral que es tener un tamaño de muestra que no requiera costos muy altos ni mucho tiempo, pero que el resultado sean lo más preciso posible.

Posteriormente, se calculó el tamaño de muestra con base en la distribución Chi-cuadrado y se consideró la misma varianza para todos los estratos. El tamaño de muestra se calculó mediante la fórmula:

$$n = \frac{B\Pi_i(1 - \Pi_i)}{b_i^2} \quad (1)$$

Donde b_i es la exactitud requerida (expresada como una proporción, de modo que 0.05 es equivalente al 5% de precisión), B es el valor de la distribución de chi-cuadrado con un (1) grado de libertad, k es el número de clases, Π_i la proporción del área cubierta por la clase i .

En síntesis, para el área de estudio (36 km² o 3 600 ha) se definió un tamaño de 80 muestras con teselas de 45 ha. Para este cálculo de esos tamaños de muestra se estipuló un valor de significancia del 5%, es decir, un nivel de confianza del 95%. En total se identificaron 11 categorías temáticas o estratos.

Debido a que la interpretación geomorfológica conlleva la delimitación de polígonos con un cubrimiento importante en área (polígonos significativamente grandes), se introdujo una variante al cálculo del tamaño de la muestra. En este caso no se utilizó la proporción de área mapeada sino la cantidad de polígonos por clases. Esto con el fin de evitar el sobre muestreo de unidades con un cubrimiento mayoritario del área de estudio.

3.2.2. Proyección de los puntos de muestreo

Con la distribución de la muestra por clases, se procedió a hacer la proyección de los puntos de muestreo. Esto se hizo a través de un esquema de muestreo sistemático no alineado, partiendo de la división del área de estudio en teselas de 45 hectáreas (Figura 7). La figura de la izquierda indica la distribución de puntos de validación sobre un mapa geomorfológico preliminar y la de la derecha los mismos puntos de validación en un ortofotomosaico para observar el entorno biofísico del área de estudio.

El hecho de implementar el muestreo a través de teselas garantiza un cubrimiento y una distribución homogénea de los puntos en toda el área de estudio. En este caso, los puntos de muestreo se generaron a partir de los centroides de dichas teselas. Luego de esto, se realizó su asignación con base en la distribución planteada. En algunos casos se desplazaron los puntos a las unidades correspondientes para garantizar que todas las clases estuviesen muestreadas a la proporción definida. Este último punto da el carácter de “no alineado” al diseño de muestreo.

Si bien la metodología implementada para la proyección de los puntos resulta mucho más dispendiosa que el aplicar una distribución aleatoria simple para la clase, lo que se busca es cubrir homogéneamente toda la interpretación. Es de esperarse que la persona que proyecte los puntos de verificación no sea la misma que realice la verificación temática con el fin de evitar algún sesgo en el proceso.

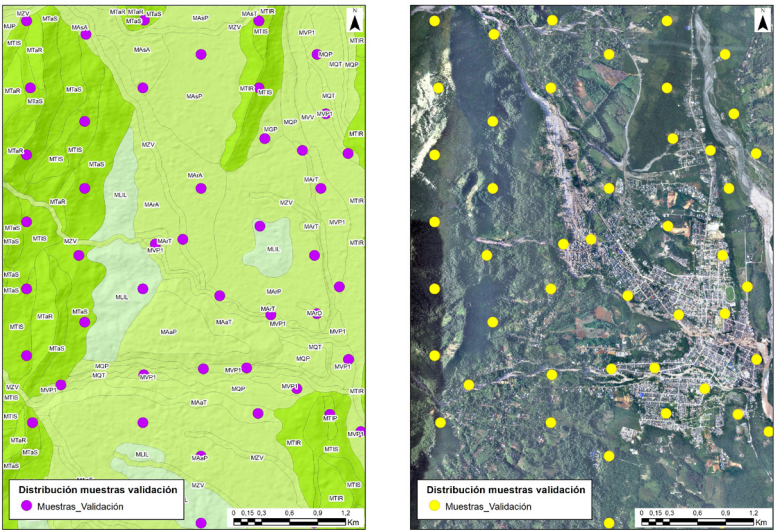


Figura 7. Distribución de los puntos de muestreo.

3.2.3. Validación temática de los puntos de muestreo

Para el proceso de validación temática de los puntos de muestreo se realizó haciendo un barrido de estos y, según el criterio del intérprete, se seleccionó la clase a la que pertenece (tipo de relieve y forma del terreno).

Dada la complejidad de este tipo de interpretación fue necesario recrear, en lo posible, el ambiente bajo el cual los intérpretes realizan este proceso. Para esto, se dispuso de archivo de mapa (mxd) con todos los insumos cartográficos desplegados, según los parámetros de visualización (color, transparencia y orden de capas).

Debido a que el ortofotomosaico solo tiene cubrimiento en un 29% del área de estudio, la validación temática únicamente se realizó para el sector norte correspondiente al área de cobertura del insumo mencionado (Figura 8). En este sentido se extrajo una sub-muestra de los puntos inicialmente proyectados seleccionando aquellos que coincidieran espacialmente con esta porción del área. Por esto, de los 205 puntos proyectados, solo 52 fueron verificados (representando además 16 de las 24 clases temáticas definidas).

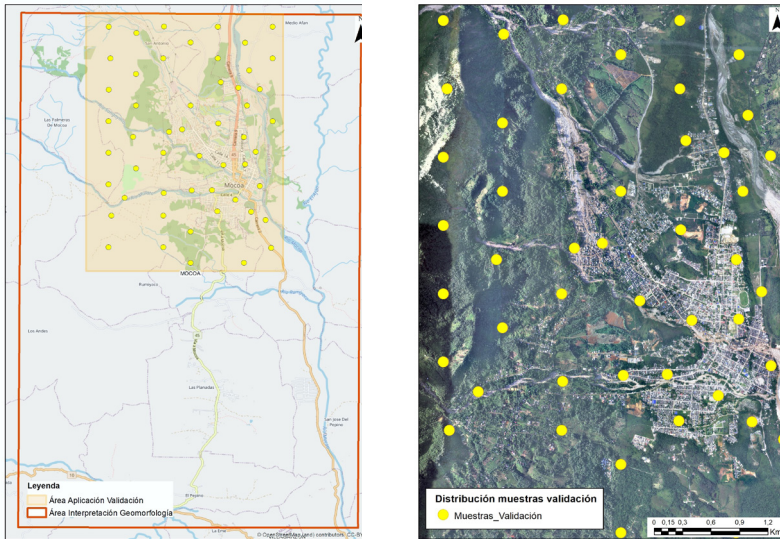


Figura 8. Área de aplicación de la validación temática.

Debido a que la interpretación geomorfológica tiene un proceso integral en el que la forma y grado de inclinación de las pendientes, la elevación, la geología y demás insumos son considerados, el proceso de validación también demanda esta información. Más aún, dada las dimensiones de los polígonos presentes en las capas no se recomienda usar la misma escala de digitalización usada por el intérprete sino alternar los niveles de acercamiento que posibiliten comprender el contexto del lugar verificado.

Para complementar este proceso de validación, se incluyó un atributo adicional denominado “Observaciones” en el cual se registran algunos comentarios adicionales sobre la interpretación, relacionados, primero con la identificación de la geoforma y en segundo lugar con la calidad de la delineación en el trazado de las unidades espacializadas. La panorámica de algunas geoformas validadas se encuentra en la Figura 9.

Este proceso demanda de la experticia y el conocimiento de un profesional especializado en el tema. Lo mismo que el acordar unos criterios temáticos mínimos que reduzcan la subjetividad entre intérpretes. Además del apoyo en otros recursos bibliográficos como el Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos de suelos (IGAC, 2018). Una vez logrado esto, se construyó la matriz de confusión.

Para este caso, la validación de la interpretación se realizó en una zona que había sido interpretada por un solo interprete, no obstante, cuando se esté validando el trabajo de varios intérpretes en la misma zona de trabajo, se reconviene a cada uno de ellos y se sugiere que se llegue a un acuerdo, en el evento de que existan discrepancias en zonas colindantes, es decir, donde se comparta la continuidad de una línea o una clase geomorfológica.



Movimiento en masa en el tipo de relieve filas y vigas sobre rocas ígneas
Vereda Campucana, Municipio de Mocoa



Tipo de relieve: manto coluvial del paisaje montaña
Vía resguardo Yunguillo, Municipio de Mocoa



En primer plano Lomas del paisaje de Montaña, al fondo revés de Crestón
Vereda San Carlos, Municipio de Mocoa



Tipo de relieve manto coluvial del paisaje montaña
Vía resguardo Yunguillo, Municipio de Mocoa



Tipo de relieve crestón del paisaje montaña desarrollado sobre areniscas de la Formación Caballos
Vía Villagarzón, aeropuerto



En primer plano, tipo de relieve plano de inundación de río trezado del río Caquetá, al fondo se observa el talud del tipo de relieve abanico terraza y tipos de relieve del ambiente estructural

Figura 9. Panorámica de algunas geomorfológicas del área.

Fuente: Subdirección de Agrología (IGAC, 2018).

3.2.4 Construcción de la matriz de confusión

Una vez concluida la fase de validación temática, se consolidaron los resultados en una misma capa las clasificaciones de referencia y la clasificación asignada a través de la interpretación. Este proceso se hizo a través de herramientas de superposición espacial entre los puntos de muestreo y el archivo vectorial de la geomorfología.

El hecho de contar con ambos atributos en un mismo archivo facilita cuantificar los aciertos y desaciertos entre ambas fuentes. Entendiendo como acierto a aquellos puntos en los que, tanto la interpretación como la validación, corresponden a la misma clase temática.

Con base en esta información se construyó la matriz de confusión y se calcularon las respectivas métricas, cuyos resultados se discutirán en la siguiente sección.

Para el área de estudio (36 km²) se definió un tamaño de 205 muestras. Se tuvo en cuenta que para el cálculo de esos tamaños de muestra se estipuló un valor de significancia del 5%, es decir, un nivel de confianza del 95%. En total se identificaron 24 categorías temáticas o estratos.

Con el tamaño de la muestra se realizó una distribución proporcional de la muestra total por estrato, a partir de la proporción de polígonos presentes para cada clase. Esto da cuenta de que los polígonos con mayor representatividad tendrán también asignados una mayor proporción de la muestra (Tabla 7).

Tabla 7. Distribución de las muestras en la capa geomorfológica

<i>Clase</i> <i>Tipo de relieve-forma del terreno</i>	<i>Núm. de</i> <i>polígonos</i>	<i>Proporción</i> <i>polígonos</i>	<i>Núm. de</i> <i>muestras</i>	<i>Muestras</i>
Abanico aluvial reciente - bajo	1	0,0027	0,55	1
Abanico aluvial reciente - cuerpo	1	0,0027	0,55	1
Abanico terraza - bajo	1	0,0027	0,55	1
Crestón - resalto	1	0,0027	0,55	1
Glacis de acumulación - cuerpo	1	0,0027	0,55	1
Loma - ladera	1	0,0027	0,55	1
Valle estrecho - Vega	1	0,0027	0,55	1
Abanico aluvial reciente - ápice	2	0,0053	1,10	1
Abanico aluvial subreciente - talud	2	0,0053	1,10	1
Abanico aluvial subreciente - ápice	3	0,0080	1,65	2
Valle estrecho - plano de terraza 2	3	0,0080	1,65	2
Abanico aluvial reciente - talud	4	0,0107	2,20	2
Abanico aluvial subreciente - cuerpo	5	0,0134	2,74	3
Abanico aluvial antiguo - cuerpo	6	0,0160	3,29	3
Abanico aluvial antiguo - talud	6	0,0160	3,29	3
Manto coluvial - cuerpo	10	0,0267	5,49	5

<i>Clase Tipo de relieve-forma del terreno</i>	<i>Núm. de polígonos</i>	<i>Proporción polígonos</i>	<i>Núm. de muestras</i>	<i>Muestras</i>
Abanico terraza - talud	14	0,0374	7,68	8
Fila y viga - ladera	25	0,0668	13,72	14
Vallecito - vega	25	0,0668	13,72	14
Abanico terraza - cuerpo	26	0,0695	14,27	14
Loma - ladera	28	0,0749	15,37	15
Valle estrecho - plano de terraza 1	38	0,1016	20,85	20
Crestón - revés	72	0,1925	39,51	39
Crestón - frente	98	0,2620	53,78	53

De los 205 puntos proyectados, solo 52 fueron verificados; representando además 16 de las 24 clases temáticas definidas.

4. Resultados

A continuación, se muestran resumidos los resultados de la matriz de confusión que se construyó. En la Tabla 8, se identifican las clases temáticas evaluadas con base en la leyenda de clasificación de la capa interpretada.

Tabla 8. Clases temáticas evaluadas

Abanico aluvial reciente - cuerpo	Crestón - revés
Abanico aluvial reciente - ápice	Crestón - frente
Abanico aluvial subreciente - ápice	Crestón - resalto
Abanico aluvial subreciente - cuerpo	Abanico aluvial reciente - bajo
Valle estrecho - plano de terraza 1	Abanico aluvial reciente - talud
Vallecito - vega	Glacis de acumulación - cuerpo
Abanico Terraza - cuerpo	Abanico aluvial antiguo - talud
Loma - ladera	Abanico aluvial antiguo - cuerpo

En la diagonal principal de la matriz, se registran 48 puntos clasificados correctamente (acuerdos), distribuidos según como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Número de acuerdos identificados por clases

<i>Nombre de la clase</i>	<i>Núm. de aciertos por clase</i>	<i>Nombre de la clase</i>	<i>Núm. de aciertos por clase</i>
Crestón - frente	15	Abanico aluvial antiguo - talud	1
Valle estrecho - plano de terraza 1	12	Abanico aluvial reciente - cuerpo	1

<i>Nombre de la clase</i>	<i>Núm. de aciertos por clase</i>	<i>Nombre de la clase</i>	<i>Núm. de aciertos por clase</i>
Loma - ladera	4	Abanico aluvial reciente - ápice	1
Crestón - revés	3	Abanico terraza - cuerpo	1
Abanico aluvial subreciente - ápice	2	Crestón - resalto	1
Vallecito - vega	3	Abanico aluvial subreciente - cuerpo	0
Abanico aluvial reciente - talud	2	Abanico aluvial reciente - bajo	0
Abanico aluvial antiguo - cuerpo	2	Glacis de acumulación - cuerpo	0

En los marginales de la matriz (celdas por fuera de la diagonal principal), se identificaron cuatro desacuerdos entre la capa interpretación y el resultado de la validación (referencia) (Tabla 10).

Tabla 10. Desacuerdos interpretación – validación; identificados en la matriz de confusión

<i>Punto</i>	<i>Capa interpretada</i>	<i>Referencia</i>
1	Crestón Revés	Crestón Frente
2	Abanico aluvial subreciente Cuerpo	Abanico aluvial subreciente Ápice
3	Abanico aluvial reciente Bajo	Vallecito Vega
4	Glacis de acumulación Cuerpo	Crestón Frente

En cuanto a las métricas, para la capa interpretada se determinaron los resultados presentados en la Tabla 11. En esta se destaca que las geoformas abanico aluvial subreciente – cuerpo, abanico aluvial reciente – bajo y glacis de acumulación – cuerpo presentan una exactitud de usuario igual a cero. Esto se debe a que únicamente se evaluó una muestra para estas clases, las que además presentaron errores de asignación en la capa. Además, la clase valle estrecho – plano de terraza 1 presentó una exactitud de usuario igual a 75%.

De otro lado, las métricas para la clasificación de referencia se muestran en la Tabla 10. Se resaltan las clases abanico aluvial sub- reciente ápice y crestón frente con exactitudes de productor de 66,67% y 88,24% respectivamente. Los valores de na se deben a que únicamente se evaluó una muestra para estas clases, las que además presentaron errores de asignación en la capa interpretada.

Tabla 11. Métricas de la matriz de confusión para la capa interpretada

<i>Capa interpretada</i>	<i>Exactitud usuario (%)</i>	<i>Error comisión (%)</i>	<i>Marginales filas</i>	<i>Capa interpretada</i>	<i>Exactitud usuario (%)</i>	<i>Error comisión (%)</i>	<i>Marginales filas</i>
Abanico aluvial reciente cuerpo	100	0	0,02	Crestón revés	75	25	0,08
Abanico aluvial reciente ápice	100	0	0,02	Crestón frente	100	0	0,29
Abanico aluvial subreciente ápice	100	0	0,04	Crestón resalto	100	0	0,02
Abanico aluvial subreciente cuerpo	0	100	0,02	Abanico aluvial reciente bajo	0	100	0,02
Valle estrecho plano de terraza 1	100	0	0,25	Abanico aluvial reciente talud	100	0	0,04
Vallecito vega	100	0	0,04	Glacis de acumulación cuerpo	0	100	0,02
Abanico terraza cuerpo	100	0	0,02	Abanico aluvial antiguo talud	100	0	0,02
Loma ladera	100	0	0,08	Abanico aluvial antiguo cuerpo	100	0	0,04

Tabla 12. Métricas de la matriz de confusión para la clasificación de referencia

<i>Clasificación de referencia</i>	<i>Exactitud productor</i>	<i>Error omisión</i>	<i>Marginales columnas</i>	<i>Clasificación de referencia</i>	<i>Exactitud productor</i>	<i>Error omisión</i>	<i>Marginales columnas</i>
Abanico aluvial reciente cuerpo	100	0	0,02	Crestón revés	100	0	0,06
Abanico aluvial reciente ápice	100	0	0,02	Crestón frente	88,24	11,76	0,33

<i>Clasificación de referencia</i>	<i>Exactitud productor</i>	<i>Error omisión</i>	<i>Marginales columnas</i>	<i>Clasificación de referencia</i>	<i>Exactitud productor</i>	<i>Error omisión</i>	<i>Marginales columnas</i>
Abanico aluvial subreciente ápice	66,67	33,33	0,06	Crestón resalto	100	0	0,02
Abanico aluvial subreciente cuerpo	na	0	0	Abanico aluvial reciente bajo	na	0	0
Valle estrecho plano de terraza 1	100	0	0,23	Abanico aluvial reciente talud	100	0	0,04
Vallecito vega	75	25	0,08	Glacis de acumulación cuerpo	na	0	0
Abanico terraza cuerpo	100	0	0,02	Abanico aluvial antiguo talud	100	0	0,02
Loma ladera	100	0	0,08	Abanico aluvial antiguo cuerpo	100	0	0,04

Por último, se determinó el Índice Kappa como la métrica que proporciona más información sobre la exactitud temática. En este sentido, el valor de Kappa estimado es de 0,90 lo que muestra un nivel de acuerdo casi perfecto entre la capa de interpretación geomorfológica y la información de referencia. En la Tabla 13 se muestra un resumen general de las métricas obtenidas en este ejercicio de validación.

Tabla 13. Resumen general de las métricas obtenidas

Aciertos	48
Desaciertos	4
Puntos validados	52
Confiabilidad del mapa P_o	0,92
P_e	0,16
kappa	0,90

En la matriz de error se puede observar que del total de las 52 muestras analizadas 48 fueron clasificadas correctamente. La exactitud general de la

capa o fiabilidad global es de 92 % resultado de la suma de la diagonal principal (muestras clasificadas correctamente) dividida por el total de muestras. En cuanto a las observaciones registradas durante la validación se tienen algunas observaciones por parte de los profesionales temáticos (Tabla 14).

Tabla 14. Identificación de puntos comentados por el experto temático

<i>Tipo relieve y tipos de terreno</i>	<i>Número de puntos verificados</i>	<i>Número de puntos comentados</i>	<i>Observación</i>
Valle estrecho plano de Terraza 1	8	4	Verificar posición de la terraza. Verificar delineación del polígono
Vallecito vega	2	2	Verificar delineación del polígono
Loma ladera	4	1	Verificar delineación del polígono
Crestón revés	4	1	Verificar delineación del polígono
Crestón frente	15	3	Verificar delineación del polígono
Abanico aluvial reciente Talud	2	1	Verificar delineación del polígono
Abanico aluvial antiguo cuerpo	2	2	Verificar delineación del polígono

De manera gráfica se puede observar en la Figura 10 que con color naranja se advierte que debe hacerse una revisión de la delineación de la geoforma correspondiente y con color azul las clases que tienen una delineación correcta. Así, ara los abanicos aluviales antiguos y los vallecitos se recomienda verificar la delineación del polígono, lo mismo que para los valles estrechos y abanicos aluviales recientes. Esto, como una guía para priorizar aquellas unidades que por su forma y complejidad demanden mayor revisión.

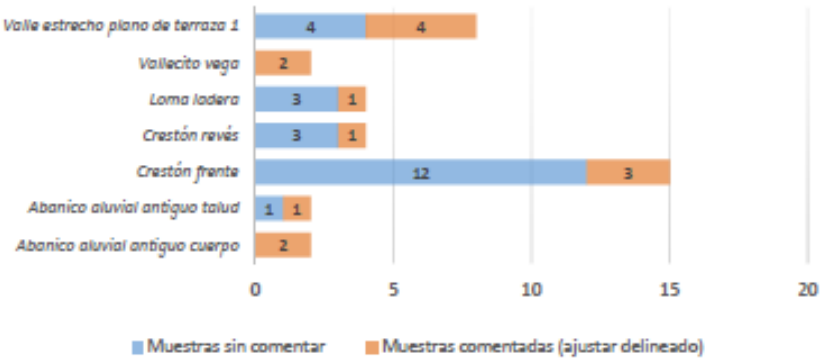


Figura 10. Gráfica de puntos comentados por el experto temático.

En la matriz de error se puede observar que del total de las 52 muestras analizadas 48 fueron clasificadas correctamente. La exactitud general de la capa o fiabilidad global es de 92%.

El valor de Kappa estimado es de 0,90 lo que muestra un nivel de acuerdo casi perfecto entre la capa de interpretación geomorfológica y la información de referencia.

Las clases abanico aluvial sub reciente ápice y crestón frente presentaron exactitudes de productor de 66,67% y 88,24% respectivamente.

Los estratos abanico aluvial sub reciente cuerpo, abanico aluvial reciente bajo y glacis de acumulación cuerpo presentan una exactitud de usuario igual a cero. Esto se debe a que únicamente se evaluó una muestra para estas clases, las cuales además presentaron errores de asignación en la capa. Además, la clase valle estrecho plano de terraza 1 presentó una exactitud de usuario igual a 75%.

5. Conclusiones

La métrica de confiabilidad de los mapas geomorfológicos garantiza a los usuarios finales (internos y externos) su calidad y usabilidad. Lo mismo que agiliza los procesos de validación temática de los productos.

En procura de garantizar la replicabilidad de la metodología se generó un script en el programa de cómputo R que posibilita el cálculo del tamaño de la muestra (teniendo en cuenta la información atributiva de las capas vectoriales de la interpretación geomorfológica).

La interpretación geomorfológica incorpora la delimitación de polígonos y la asignación temática de estos según un nivel jerárquico ligado a la escala del estudio. Esta estructura jerárquica demanda que la validación del tipo de relieve y de la forma del terreno.

Algunas discrepancias en la validación como por ejemplo, la cuestiones graduales al indicar si se está en el ápice o el cuerpo en un abanico aluvial, no puede calificarse como un error en la exactitud de posición sino temático. En consecuencia, las discrepancias en la validación temática no dependen de la calidad de los insumos para la fotointerpretación o la eficacia de los equipos de cómputo con los que se cuente, indefectiblemente, el criterio del intérprete es más eficaz que el de la cartografía a analizar.

La determinación de los tipos del muestreo está estrechamente ligada al área de estudio y a la leyenda de interpretación geomorfológica definida. Así que, según la complejidad de la zona, puede ser necesario incluir otros niveles jerárquicos para la asignación de las clases.

Para el proceso de validación temática es necesario recrear el ambiente de interpretación bajo el que se desarrollan los procesos y tener en cuenta todos los insumos cartográficos disponibles (DEM, modelo de pendientes, modelo de sombras, imágenes de satélites, bloques fotogramétricos, entre otros). Además, se sugiere que estos insumos sean los mismos que se emplearon para la interpretación de la capa.

Incluir un atributo de “Observaciones” posibilita generar información complementaria al proceso de verificación. Se recomienda estandarizar este atributo a través de dominios, con el fin de generar estadísticos más precisos.

La generación de un símbolo en la leyenda que agrupe los demás atributos considerados en la interpretación (paisaje, ambiente morfogenético, tipo de relieve, material geológico y forma de terreno) facilitaría a su vez derivar un campo único sobre el que se definan las clases del muestreo.

Debido a que el ortofotomosaico tiene un cubrimiento parcial sobre el área de estudio, únicamente se validaron 52 puntos de muestreo. Como trabajo a futuro se recomienda replicar el ejercicio para la totalidad de las muestras y cubrir el área de estudio inicialmente acordada.

A nivel interno se sugiere, replicar esta metodología en otras zonas de estudio y a futuro implementarlo como un procedimiento en los procesos cartográficos de la Subdirección, ya que de esta manera se disminuyen los costos económicos elevados en el proceso de evaluación de la calidad cuando se muestran todas las unidades, empleando un tiempo exagerado.

Importante también poder revisar a nivel externo de Colombia otras entidades que adelanten estos procesos y puedan optimizar también sus procesos de EETM soportados en esta metodología y acorde con sus lineamientos de calidad propios de cada país.

Bibliografía

- Carmel, Y., Dean D. J., & Flather C. H. (2001). Combining location and classification error sources for estimating multi-temporal database accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 (7), 865-872.
- Congalton, R.G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Third Edition (3rd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel S.A.: Barcelona, 595 pp.
- Chrisman, N. R. (1989). *Modeling error in overlaid categorical maps: the accuracy of spatial databases*. En Goodchild, M. & Gopal, S. (Eds.), Chapter 2, Taylor & Francis: London, 21-34 pp.
- Goodchild, M. F., Gouquing, S. & Shiren, Y. (1992). Development and test of an error model for categorical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (2), 87-104. <https://doi.org/10.1080/02693799208901898>
- Janssen, L. F., & Vanderwel, F. J. (1994). *Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: A review*, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(4), 419-426.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2018). *Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos de suelos. Grupo interno de trabajo de interpretación*. Cód. G40700-03/18.V3. Bogotá- Colombia.
- Instituto Geográfico Nacional (2009). *Conceptos Cartográficos*. Gobierno de España. Ministerio de Fomento: España.
- INGEOMINAS (2002). *Plancha geológica No 430 a escala 1:100 000*. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) (2010). *Norma Técnica Colombiana NTC 5043 Primera actualización. Conceptos básicos de calidad*. Bogotá.

- López de Ullibarri Galparsoro, I., & Pita Fernández, S. (1999). *Medidas de concordancia: el índice de Kappa* (169-171), Cad Aten Primaria, 6.
- Mas, J., Díaz, J., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 51, 53-72. <https://doi.org/10.14350/rig.30414>
- McRoberts, R., Tomppo, E., & Czaplewski, R. (2011). Diseños de muestreo de las Evaluaciones Forestales Nacionales. *Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales*. FAO, 21 pp.
Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/national_forest_assessment/images/PDFs/Spanish/KR2_ES_4_.pdf
- Niño, E. (2011). Calidad de datos geoespaciales básicos. *UD y la Geomática*, 4, 110-116. <https://doi.org/10.14483/23448407.3661>
- Peralta-Higuera, A., Palacio, J. L., Bocco, G., Mas, J. F., Velázquez, A., Victoria, A., Bermúdez, R., Martínez, U., & Prado, J. (2001). Nationwide Sampling of Mexico with Airborne Digital Cameras: an Image Database to Validate the Interpretation of Satellite Data. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 18th Biennial Workshop on Color Photography & Videography in Resource Assessment. Amherst, Massachusetts, Mayo 16-18, Trabajo no. 20, 1-9.
- Pontius, R. G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (8), 1011-1016.
- Pontius R. G. (2002). Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps and multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (10), 1041-1049.
- Programa ONU-REDD++ (2017). Informe final de evaluación de exactitud temática del mapa de cobertura forestal y cambio de uso de la tierra para los años 2000, 2005 y 2011. Recuperado de http://www.infona.gov.py/application/files/6514/7405/3096/Evaluacion_exactitud_Mapas_000511_160516.pdf
- Ramírez, S. Ramírez, H. Galindo, G. & Espejo, O. (2015). Evaluación de la exactitud temática del mapa de Cambio de bosque para la región amazónica colombiana en el periodo 2010-2012. *UD y la Geomática*, 10, 27-36. <https://doi.org/10.14483/23448407.7885>
- Stehman, S. V., & Czaplewski R. L. (1998) Design and Analysis for Thematic Map Accuracy Assessment: Fundamental Principles. *Remote Sensing Environment*, 64 (3), 331-344. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00010-8)
- Strahler, A. H., Boschetti, L., Foody, G. M., Friedl, M. A., Hansen, M. C., Herold, M.,... & Woodcock, C. E. (2006). Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps. *European Communities, Luxembourg*, 51(4), 1-60. Recuperado de <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.492.6490&rep=rep1&type=pdf>
- Zinck, J. A., (1987). *Aplicación de la geomorfología al levantamiento de suelos en zonas aluviales y definición del ambiente geomorfológico con fines de descripción de suelos*. Bogotá D.C., Colombia.

Fuentes de datos

- Alcaldía de Mocoa (2020). <https://www.mocoa-putumayo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>

- Archive, A. S.-A., Agency-JAXA, J. A., & Administration-NASA, N. A. (2011). ASF's Radiometric Terrain Correction Project. Modelo Digital de Elevación-DEM.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2021). Colombia en Mapas. Recuperado de <https://www.colombiainmapas.gov.co/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi , Subdirección de Agrología. (2018). Cartografía Geomorfológica. Escala 1:25 000.
- Instituto Geográficos Agustín Codazzi, (2017). Banco Nacional de Imágenes. Imágenes Planet Scope. 20171216_145124_1027_3B/20171216_145123_1027_3B.
- Instituto Geográficos Agustín Codazzi, ubdirección de Geografía y Cartografía (2017). Ortofotomosaico- Nivel 2. Municipio de Mocoa.
- NASA (enero de 2020). Sistema de información y datos del sistema de observación de la Tierra (EOSDIS). Recuperado de <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>