R. Ra'e Ga DOI: 10.5380/raega
Curitiba, v.41 Temático de Geomorfologia , p. 189 -207 , Ago/2017 eISSN: 2177-2738

CLASIFICACIÓN DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO NEVERÍ, VENEZUELA

CLASSIFICAÇÃO DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS NA BACIA DO RIO NEVERI, VENEZUELA

GEOMORPHOLOGICAL UNITS CLASSIFICATION IN THE NEVERI RIVER BASIN, VENEZUELA

Maria Jose Entrena Pineda[1], Luis Eduardo Souza Robaina, [2], Romario Trentin,[3] e Rhael David Lara Partida[4]

RESUMEN

El análisis geomorfológico permite la comprensión de relieve como elemento dinámico de la superficie terrestre, donde se materializan los diversos procesos sociales En el contexto del análisis digital del relieve como subsidio al modelado geomorfológico, el presente trabajo tiene como objetivo aplicar una clasificación geomorfológica parametrizada a partir del modelo digital de terreno (MDT) con atributos topográficos para mapear formas de relieve y formas de vertientes en una cuenca hidrográfica. El MDE proveniente de datos del satélite ALOS/PALSAR, con un tamaño de pixel de 12,5x12,5 metros interpolado con datos vectoriales. Fueron calculados cuatro (4) atributos topográficos: forma de vertiente (curvatura en plano y en perfil), pendiente, relieve sombreado e hipsometría. La clasificación se realizó a partir de la discretización de las variables mediante criterios determinísticos cuyos valores pueden ser aplicados en áreas distintas. El resultado de la clasificación fueron siete (7) unidades geomorfológicas dentro de la cuenca del río Neverí. A su vez se realizó una subdivisión de la cuenca para analizar las curvas e integrales hipsométricas y determinar los procesos de evolución dentro de la cuenca, los cuales evidenciaron que la cuenca en sus partes altas se encuentra en un estado de madurez (equilibrio en el sistema) en sus volumen de masa con respecto a los procesos erosivos, mientras que en la partes medias y bajas se caracterizan por encontrarse en una etapa senil debido a los procesos de transporte en la cuenca media y acumulación - sedimentación en la cuenca baja..

PALABRAS CLAVE: Análisis digital, geomorfología, equilibrio, desequilibrio, monadnock

RESUMO

A análise geomorfológica permite a compreensão do relevo como um elemento dinâmico da superfície da terra, onde se materializam vários processos sociais. No contexto de análise digital do relevo como subsídio para a modelagem geomorfológico, este trabalho tem como objetivo aplicar uma classificação geomorfológica parametrizada a partir do modelo digital de elevação (DEM) e atributos topográficos para mapear formas de relevo e de vertentes na bacia hidrográfica. Os dados vetoriais do MDE, foram interpolados, com um tamanho de pixel de 12,5x12,5 metros. Foram calculadas quatro (4) atributos topográficos: forma (curvatura no plano e perfil), declividade, hipsometria e relevo sombreado. A classificação foi feita a partir da discretização das variáveis usando critérios determinísticos cujos valores podem ser aplicados em diferentes áreas. O resultado da classificação foram sete (7) unidades geomorfológicas dentro da bacia do rio Neverí. Por sua vez uma subdivisão da bacia foi realizada para analisar as curvas e integrais hipsométricas e determinar os processos de evolução no interior da bacia, o que mostrou que a bacia em seu curso superior se encontra num estado de maturidade (equilíbrio no sistema) no seu volume de massa em relação à erosão, enquanto que no meio e baixo curso são caracterizados por estar em uma fase senil pois predominam os processos de transporte no médio curso e acumulação - sedimentação no baixo curso.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Digital, geomorfologia, equilíbrio, desequilíbrio, monadnock.

ABSTRACT

In the context of the digital analysis of the relief as a subsidy to geomorphological modeling, the present work aims to apply a parametrized geomorphological classification. The geomorphological analysis allows the understanding of relief as a dynamic element of the terrestrial surface, where several social processes materialize. From the digital

[1] *Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria/RS, e-mail: mariajoseentrena@gmail.com*
[2] *Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria/RS, e-mail: lesrobaina@yahoo.com.br*
[3] *Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria/RS, e-mail: romario.trentin@gmail.com*
[4] *Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria/RS, e-mail: rhael.lara5@gmail.com*

elevation model (DEM) and topographic attributes to map relief forms and slope forms in a river basin. The DEM, interpolated by vector data, from a pixel size of 12.5 x 12.5 meters. Four (4) topographic attributes were calculated: slope shape (flat and profile curvature), slope, shaded relief and hypsometry. The classification was made from the discretization of the variables by deterministic criteria whose values can be applied in different areas. The result of the classification were seven (7) geomorphological units within the Neverí river basin. In turn, a subdivision of the basin was performed to analyze the hypsometric curves and its integrals to determine the evolution processes within the basin, which showed that the basin in its upper parts is in a state of maturity (equilibrium in the system) and in their mass volume with respect to the erosive processes, while in the middle and lower parts they are characterized for a senile stage due to transport processes in the middle basin, accumulation and sedimentation in the lower basin.
KEY-WORDS: Digital Analysis, geomorphology, equilibrium stage, inequilibrium stage, monadnock.

Recebido em: 11/05/2017
Aceito em: 12/07/2017

1.INTRODUCCION

En el contexto de las ciencias de la superficie terrestre, Christofoletti (1980) define la geomorfología como la ciencia que estudia el origen y evolución del relieve en la superficie de la Tierra. En la misma línea Ross (1990) se ocupa de las formas en que el relieve exhibirá los resultados de las acciones de los diversos procesos que se evidencian, bien sea por variaciones topográficas y/o morfológicas y donde se abre un espacio para el acción de la fuerza de la gravedad, la cual es la responsable del movimiento de la materia y energía ya sea en estado líquido o sólido dando inicio a un proceso continuo de desgaste en las partes elevadas y de acumulación en la partes bajas, y esto conlleva a formar la interfaz litosfera-atmósfera-hidrosfera-biosfera, que desempeña un papel importante en los estudios ambientales.

Esta dinámica permite que el modelado geomorfológico sea asistido por la disponibilidad de modelos digitales del terreno y la capacidad de procesamiento sea optimizado en entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales proporcionan condiciones favorables para diversas aplicaciones en el medio ambiente, tales como geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas, así como la elaboración de mapas de susceptibilidad a procesos geo-ambientales, la fragmentación y la evolución del paisaje y otras aplicaciones (SILVEIRA, 2016).

En ese sentido, Wood (1996) plantea que la parametrización del relieve se refiere a la representación cuantitativa de las características morfológicas del paisaje y que son continuamente descritas por ecuaciones aplicadas, y de esta forma generar los modelos de representación numérica de altimetría que se derivan en atributos topográficos. Estos atributos representan las medidas cuantitativas de las formas del relieve mediante técnicas empleadas en los entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (HENGL, 2003; WOOD, 1996).

Es por esta razón que la importancia de la clasificación del relieve radica en su utilización en el campo de la planificación y el ordenamiento territorial, en la zonificación ambiental, en la cartografía geomorfológica, -relacionados con el suelo-,y en la susceptibilidad geo-ambiental, entre otros (TRENTIN; ROBAINA; SILVEIRA, 2015)

En ese mismo sentido, la clasificación morfométrica se apoya en los atributos cuantitativos (variables) morfométricas derivadas del componente topográfico donde se representan elementos cuantificables en la superficie terrestre. Estos atributos topográficos se pueden parametrizar por variables tales como altitud, pendiente, aspecto, curvaturas (perfil y plano), áreas de contribución (red de drenaje), entre otros (GUADAGNIN; TRENTIN, 2014).

Lo anterior representa el contexto para proceder a analizar los espacios naturales y en ese sentido la cuenca puede ser considerada como un ejemplo de sistema geomorfológico complejo, ya que tiene todas las características inherentes. La cuenca se encuentra abierta a los flujos de energía y es un sistema en el que las entradas están representadas por la precipitación y las fuerzas tectónicos subyacentes y las salidas representadas por la pérdida de agua y

sedimentos. Su configuración jerárquica es otra característica básica atenida a los sistemas geomorfológicas complejos (MATTOS; FILHO, 2004).

Independientemente del enfoque elegido para el análisis geomorfológico, la identificación de los subsistemas no se puede realizar de forma individual con cada uno de sus componentes: estructura, función y organización, que son el resultado de interrelaciones entre ellos (MATTOS; FILHO, 2004).

Siendo una unidad organizada, la cuenca hidrográfica se encuentra conformada por subsistemas, donde sus interacciones dan lugar a la organización y estructuración del sistema de manera integrada. La delimitación de estos subsistemas puede variar en función de la perspectiva a ser considerada, por ejemplo, desde la perspectiva funcional la cuenca puede ser subdividida en zonas de producción, transferencia y deposición, donde cada uno representa un subsistema. Desde el punto de vista morfológico se estructura en dos subsistemas identificados como vertientes y canales fluviales (MATTOS; FILHO, 2004).

Uno de los elementos que resulta interesante analizar en este contexto es la curva hipsométrica para la cuenca de drenaje, la cual representa la proporción relativa de área bajo una altura dada (Strahler, 1952). Esta curva es una herramienta muy útil para caracterizar el relieve dentro de una cuenca de drenaje y comparar los datos con cuencas adyacentes. La forma de esta curva está íntimamente ligada con el estadio de evolución de la cuenca. Curvas convexas serán características de relieves jóvenes, curvas con forma en “s” caracterizarán a las cuencas en un estado de madurez, y curvas cóncavas se darán en zonas con relieves peniplanizados. (STRAHLER, 1952).

Por otro lado, las características de la curva hipsométrica se encuentran estrechamente relacionadas con las características de la pendiente de una cuenca de drenaje. Esto es evidente por el hecho de que las pendientes escarpadas en la sección media de una cuenca se acompañan de una tasa más rápida de cambio de elevación con respecto al cambio de la sección transversal horizontal de la cuenca.

Al principio se podría suponer que partes escarpadas de la curva hipsométrica coinciden con rangos de pendientes relativamente empinadas, partes suavemente inclinadas de la curva con suaves pendientes en las laderas de vertiente. Por lo que se describe la proporción relativa del área de la cuenca que se encuentra en o por encima de una altura dada en relación con el relieve total de la cuenca (LUO, 1998).

Diferencias en la forma de la curva y el valor de la integral hipsométrica para una forma de relieve particular se encuentra relacionado al grado de desequilibrio y/o equilibrio en el balance erosivo y las fuerzas tectónicas (PÉREZ-PEÑA; AZAÑÓN; AZOR, 2008).

Es por esto que los atributos estadísticos de la curva hipsométrica y su función de densidad proporcionan un medio cuantitativo para caracterizar la estructura planimétrica y topográfica de una cuenca hidrográfica, lo que tiene un efecto pronunciado sobre su hidrología y morfología.

Esto quiere decir que se procede analizar de forma cualitativa las formas en una topografía erosiva utilizando como unidad base la cuenca, ya sea como un sistema simple o compuesto, y se parte del supuesto que la forma de la cuenca deriva de un conjunto de interacciones de procesos de perdida de pendiente y de profundización de los canales dentro de los límites del drenaje, lo cual conlleva a ser tratados individualmente.

El presente trabajo se desarrolla en la cuenca del río Neverí, situada en la región noreste de Venezuela en los estados Anzoátegui y Sucre, cuya área es 137,671.09 ha (Figura 1), apoyado por el mapeo semi-automatizado del relieve, donde se parte de la técnica de clasificación no supervisada de las formas del terreno mediante árboles de decisión con base en los valores medios de dos variables morfométricas (hipsometría, pendiente) derivadas de un MDE.

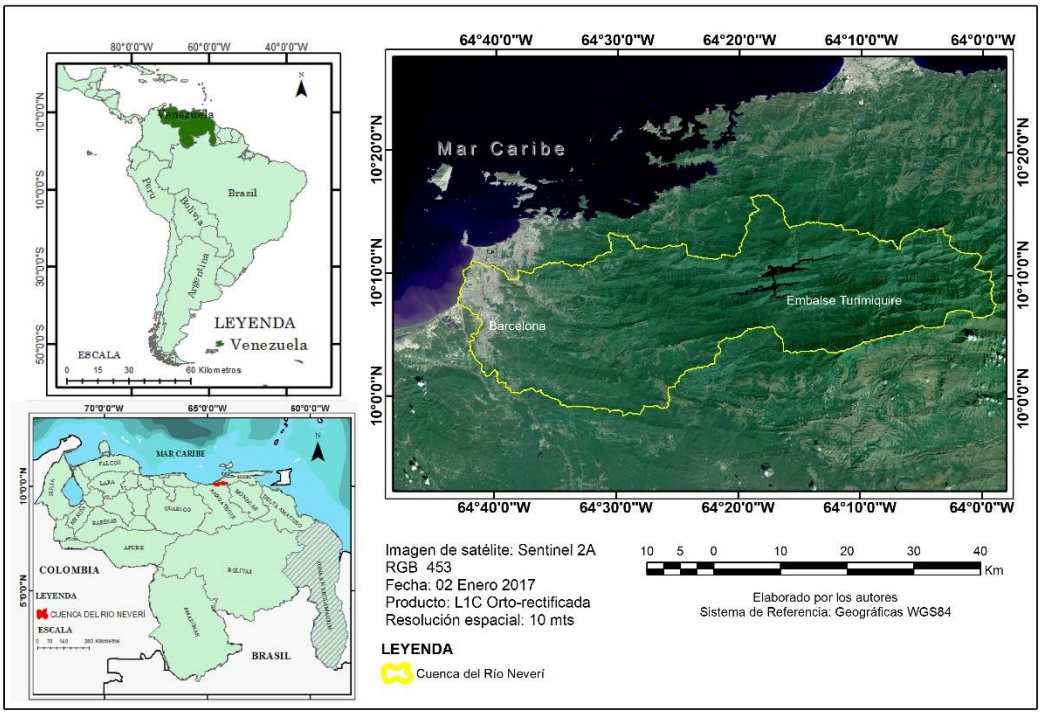

Figura 01 - Localización de la Cuenca del Río Neverí. Marco geológico de la región noriental de Venezuela

El norte de Venezuela es esencialmente una zona de frontera entre las placas del Caribe y América del Sur (Figura 2), donde está involucrado un conjunto complejo de bloques o microplacas. Este margen de placa activo de 1.600 km de largo se considera como una amplia zona de transposición tectónica o de partición de la tensión y convergencia.

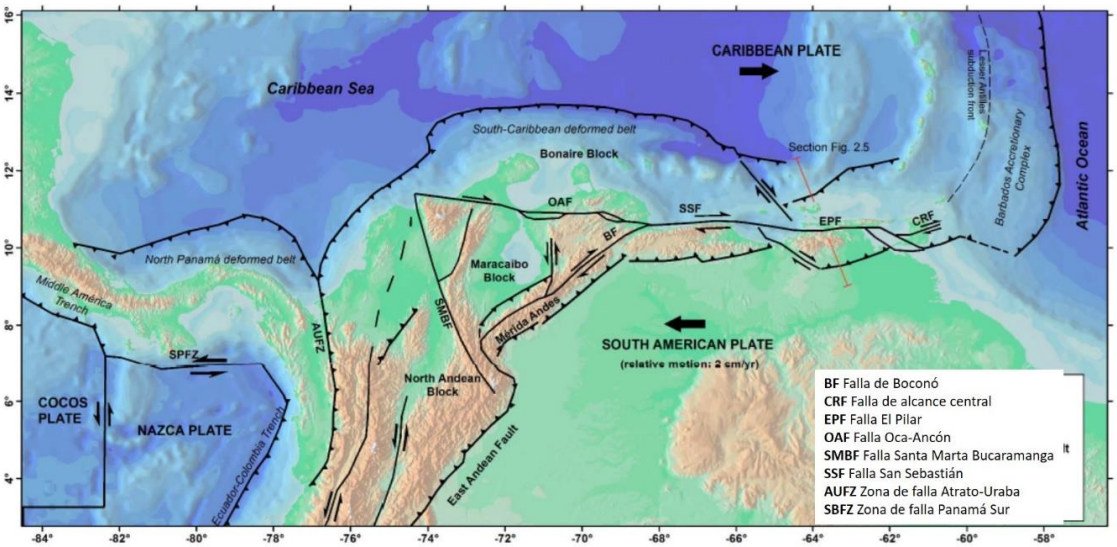

Figura 02 - Mapa esquemático de la geodinámica del sureste del Caribe (Audemard, 1999b; Audemard et al., 2000; Weber et al., 2001; Trenkampet al., 2002; Soto et al. 2007 citado por REINOZA,2014).

En ese sentido, el Este de Venezuela es una zona tectónicamente compleja, que ha sido afectada por varios procesos tectónicos tales como: (a) el rompimiento de la Pangea durante el

Jurásico; (b) la formación de un margen pasivo hacia el Norte desde el Cretácico hasta el Paleógeno; (c) la colisión oblicua iniciada durante el Mioceno entre las Placas Caribe y Suramericana, formándose la Serranía del Interior Oriental y la cuenca antepaís asociada. Se pueden identificar tres provincias geológicas: al Norte de la Falla de El Pilar se encuentran rocas metamórficas e ígneas oceánicas de Araya - Paria, hacia el Sur los sedimentos erosionados del margen pasivo aflorando en la Serranía del Interior y el Sureste los sedimentos Terciarios - Cuaternarios de la cuenca antepaís (JACOME, 2002).

En cuanto a la litología se tiene que (Alarcón y Caicedo, 2010) trabajaron en la diferenciación de los sedimentos cuaternarios en el área de Puerto La Cruz y sus alrededores, estos sedimentos forman llanuras costeras contentivas de arenas, gravas, arcillas y acumulación de material orgánico que forma capas de turba lenticulares. En este caso se indican las siguientes subdivisiones:

Abanicos aluviales a su vez subdividida en T2 de más antiguo a más reciente, depositada en ambientes fluvio-torrenciales (abanicos y llanuras de la cuenca) y T1 formada por dos eventos aluvionales, una de carácter fluvio torrencial y la otra de intercalación de areniscas y lutitas con presencia de lentes conglomeráticos.

Depósitos de aguas salobres y/o dulces, T0; una llanura costera en desarrollo por la tasa de sedimentación de la región, debidas al estancamiento de aguas salobres y/o dulces y la segunda es el acuñamiento de la zona de relieves por encima del nivel acuático de este ambiente, se asume edad Holoceno.

Paleo-Llanura Costera con facies de laguna y pantanos extintos por los aportes sedimentarios y colmatación de estas depresiones, presencia de arenas de grano fino, arenas sucias o grano grueso, limos poco frecuentes hacia la línea de costa. Se asume Holocena.

Paleo-Ambiente Próximo-Costero aflora a la línea de costa, con presencia abundante de fósiles en buenas condiciones (moluscos), arenas de tamaño de grano heterogéneo, además de una base de capa limosa que se describe como la plataforma interna o próxima costera, asumida como una variación lateral de facies de la llanura costera del Holoceno.

Playa arena y limo, dependiendo del sector varía el tamaño de grano y la presencia de fósiles erosionados por la dinámica de la línea de costa, actualmente en proceso de desarrollo. Holoceno superior.

Depósitos Coluvionales originados en las ladearas de las montañas, productos de movimientos en masa de suelos o rocas con planos sobresaturados de agua desestabilizados

Los ambientes de sedimentación suelen ser más continentales hacia el sur de la cuenca. Durante su depositación se aprecian desarrollos de arena en toda el área con manifestaciones marinas al norte. Se observan en los registros de pozos al sur, el avance de una posible línea de costa, indicando un período transgresivo, en dirección E-O, y un aporte de sedimentos de sur a norte (ARNSTEIN, SÁNCHEZ, RUSSOMANNO, Y CABRERA, 1985).

Posteriormente se hace evidente una línea de costa en dirección NE y aporte de sedimentos de SE a NO. Luego se observan períodos regresivos pasando de un ambiente de plataforma interior a uno de talud medio, por lo tanto, en adelante la influencia es marina.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las etapas operativas fueron realizadas mediante la utilización de técnicas de inferencia espacial en ambiente de sistemas de información geográfica- SIG. Estas fueron: a) la obtención de un modelo digital de elevación hidrológicamente consistente mediante la utilización de los vectores de hidrografía levantados para el proyecto PITSA-II (1998) y del modelo digital de elevación ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011) de 12,5 metros de resolución espacial; b) generación de atributos topográficos (pendiente, hipsometría y forma en perfil y plano); c) cálculo de los valores medios y de esta forma realizar la discretización de las variables, para luego proceder mediante operaciones de algebra de

mapas y obtener las diversas combinaciones de los atributos topográfico; d) realizar la organización y la cuantificación de los resultados obtenidos por en la matriz (raster).

Los datos de elevación se obtuvieron de un modelo digital de elevación (MDE) a una resolución espacial de 12,5 metros, datos que provienen del satélite ALOS-PALSAR, seguidamente, fueron generados los atributos topográficos del relieve en el software ArcGis 10.1(ESRI, 2013). Para obtener la pendiente fue utilizado las derivadas direccionales del modelo propuesto por Horn (1981), donde la pendiente corresponde a los parámetros más importantes en el análisis de las vertientes. Estos datos fueron discretizados en tres (3) clases y para el perfil y plano de curvatura fue calculado en base a las ecuaciones planteadas por Zevenbergen e Thorne (1987), las cuales se encuentran disponibles a través de la extensión Spatial Analyst de ArcGis (ESRI,2013).

En cuanto a los datos altimétricos empleados (hipsometría) fueron considerados las variaciones de amplitud dentro de la cuenca, indicando condiciones propicias para la disección en las áreas de mayor altitud y de acumulación para las áreas de menor altitud. Para eso se procedió a generar cuatro (4) clases de hipsometría basados en los quiebres naturales del histograma de frecuencia.

La pendiente fue generada a partir del MDE, ésta corresponde a uno de los atributos topográficos contemplados en el análisis para la delimitación de las unidades geomorfológicas donde se parte del supuesto que las vertientes con altas pendientes se encuentran sujetas a procesos de denudación, mientras que las vertientes con pendientes bajas son propicias a los procesos de agradación (TRENTIN; ROBAINA; SILVEIRA, 2015). Los rangos de pendiente contemplados fueron los siguientes: 0-15%; 15-45%;> 45%.

La forma de vertiente puede ser clasificada de acuerdo a la curvatura tanto en plano como perfil, el primero se encuentra referido al carácter cóncavo o convexo de la vertiente, y es considerado un elemento decisivo en la aceleración o disminución de la velocidad de la escorrentía superficial. Mientras que el segundo se refiere al carácter convergente o divergente de la vertiente en el sentido de la dinámica de flujo de agua, con influencia directa en los procesos de transporte y sedimentación. En el presente trabajo se adoptó la discretización empleada por Trentin, Robaina y Silveira (2015), donde el limite cero (0) es para determinar dos clases de perfil de curvatura (cóncavas con valores positivos y convexas con valores negativos en el histograma de frecuencia). De igual forma se procedió para clasificar el plano de curvatura partiendo de limite cero (0) para determinar las dos (2) clases de planos de curvatura obteniendo valores positivo asociados a vertientes divergentes y valores negativos asociados a vertientes convergentes.

Para elaborar el sombreado de relieve se utilizó el MDE elaborado previamente, se procedió mediante la extensión Spatial Analyst-Surface-Hillshade de ArcGIS (ESRI,2013).

La clasificación consistió en establecer combinaciones de los atributos topográficos y mediante el análisis de las relaciones establecidas fue segmentada mediante interpretación visual la respuesta cada atributo topográfico y se determinó la agrupación de siete (7) unidades geomorfológicas (Figura 3 y 4) .

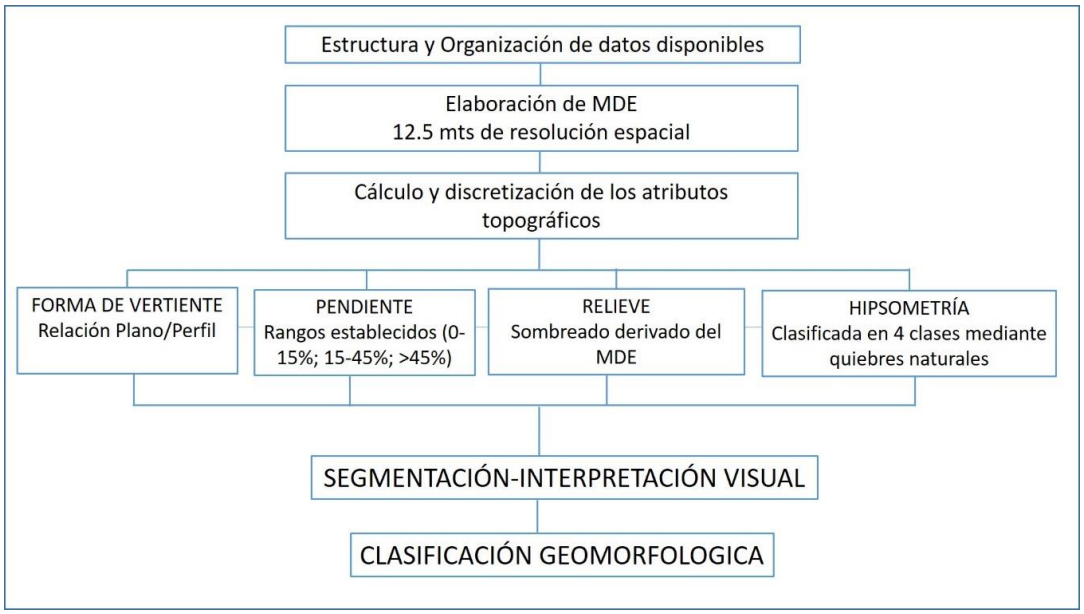

Figura 03 - Secuencia metodológica

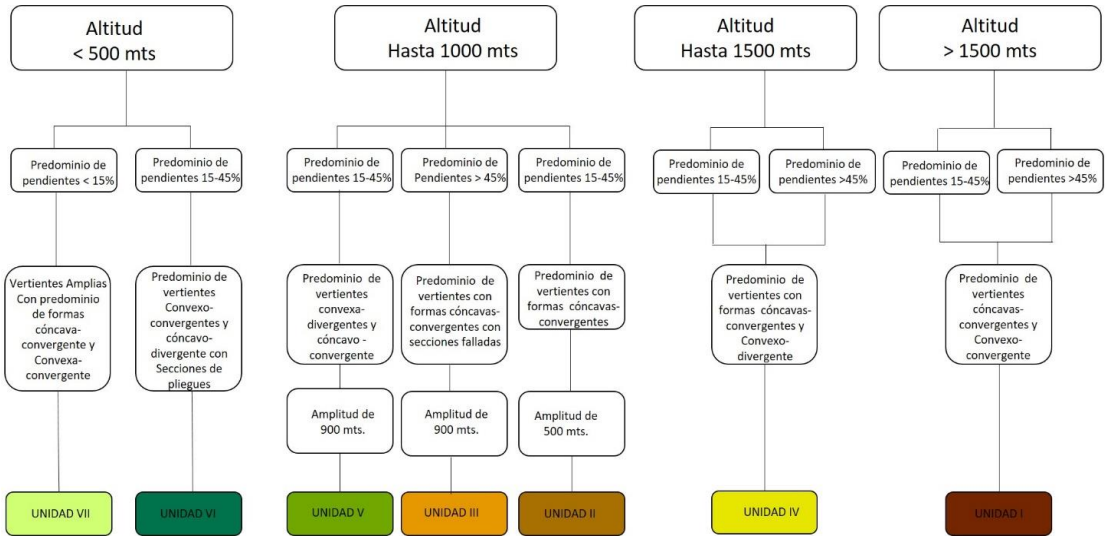

Figura 04 - Proceso de delimitación de unidades geomorfológicas en base a la respuesta de los atributos topográficos en la cuenca del río Neverí.

Adicionalmente para nutrir el análisis correspondiente a las unidades geomorfológicas se generaron las curvas e integrales hipsométricas con el objeto de conocer el comportamiento del volumen de masa presente y el estado del sistema hidrográfico en términos de juventud, madurez y senectud (monadnock). Para el presente trabajo las curvas e integrales hipsométricas fueron calculadas mediante la herramienta CalHypso (Pérez-Peña;Azañón y Azor,2009) inserida en la plataforma de usuario ArcMap de ArcGIS (ESRI,2013). Esta herramienta realiza el calcula de la curva e integral hipsométrica utilizando como insumo el MDE y el vector correspondiente a los límites de la cuenca.

3. RESULTADOS

La cuenca del río Neverí se caracteriza por la presencia de la Serranía del Interior Oriental del tipo alpino en etapa fisiográfica de madurez temprana, con plegamiento y fallamiento, generando valles interiores, colinas y lomas. (MARN, 2001).

El río Neverí desemboca en el Mar Caribe formando un delta y es una cuenca con drenaje encajado en zonas de fallas que forman un relieve de altitud importante. El paso de las zonas planas fluvio-marinas a la zona de laderas forman un escarpe prominente con amplitudes mayores de 500m. Los picos más altos se encuentran en el extremo sur-este, donde la cota altimétrica alcanza 2446 metros.

Las pendientes son predominantemente superiores a 45% marcando un relieve de fuertes pendientes y valles en gran parte de la cuenca. Sólo en el curso inferior del río que se forma un relieve agradacional fluvio-marino presente en las pendientes por debajo de 15% y áreas planas.

La forma de las vertientes se encuentra representada por los topos convexos, que forman crestas alargadas, picos y cuestas en la pendiente media. Las pendientes cóncavas-convergente son comunes por el gran número de canales que se desarrollan por la acción erosiva. Los valles están encajados formando ríos de alta energía entrelazados con anillos.

Al subdividir la cuenca en su parte alta, media y baja es posible evaluar el comportamiento del sistema hidrográfico desde un enfoque cuantitativo mediante el comportamiento de sus respectivas curvas hipsométricas y sus momentos estadísticos, los cuales es posible asociarlos directamente a los procesos que dinamizan el sistema.

En la Figura 5 y 6 se observan las curvas hipsométricas para cada una de las partes de la cuenca hidrográfica (alta, media y baja) y sus respectivos momentos estadísticos.

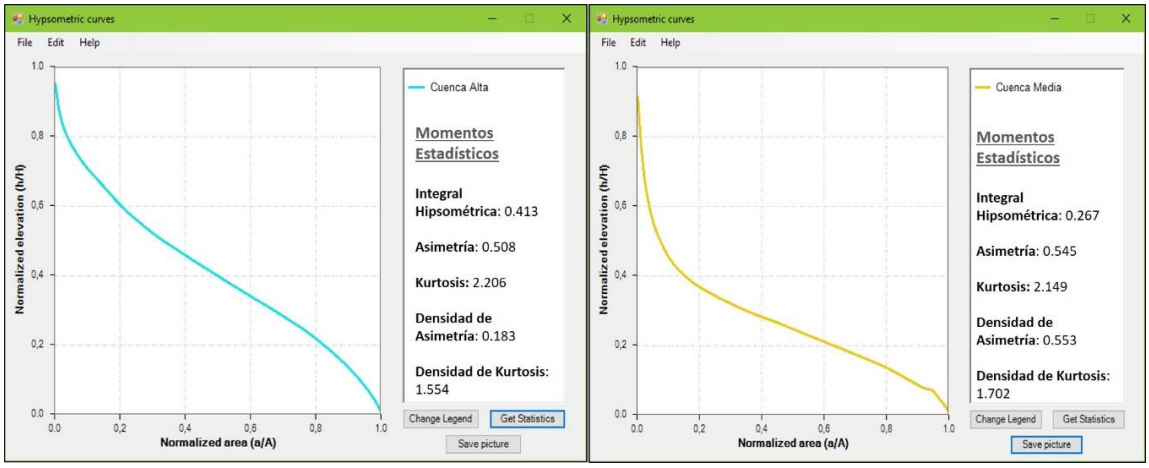

Figura 05 - Curvas Hipsométricas Cuenca Alta y Cuenca Media Río Neverí

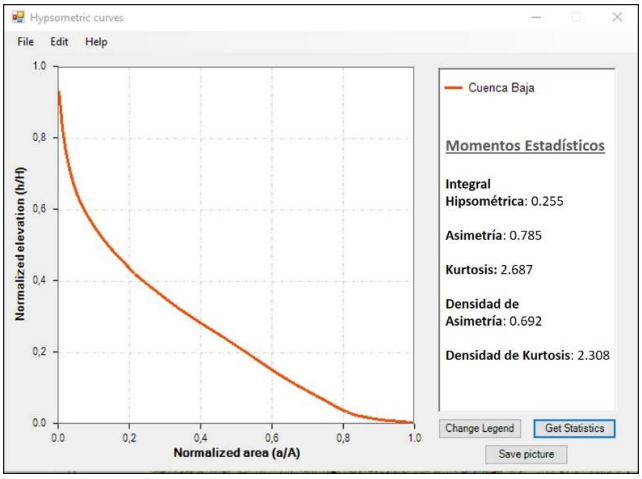

Figura 06 - Curva Hipsométrica Cuenca Baja del Río Neverí.

Para la cuenca alta se tiene que su integral hipsométrica se encuentra en el inicio de una etapa de equilibrio (fase de madurez) ya que el valor de la integral se encuentra en el rango correspondiente de 0.35 – 0.60, su forma sinuosa es la forma típica para de cuencas de tercer (3°) o cuarto (4°) orden, siendo en este caso específico una cuenca de 3° orden en rocas con litologías relativamente homogéneas.

Por otro lado, la cuenca media presenta un cambio de fase a la fase de senectud (senil) ya que su integral hipsométrica arroja un valor de 0.267; esta fase de monadnock se desarrolla en el rango comprendido desde 0 a 0.350 respectivamente.

Mientras que en la cuenca baja la forma de la curva hipsométrica cambia, pero su integral hipsométrica se mantiene en la etapa senil de desarrollo del sistema hidrográfico con un valor de 0.255 (Strahler,1952). A su vez, la curva muestra una forma más cóncava que las curvas de la parte alta y media, asociado directamente con el cambio litológico y la respectiva resistencia a los procesos erosivos.

En la Figura 7 se muestra el mapa hipsométrico, el cual representa la característica espacial de los valores de altitud de forma individual analizados mediante las curvas hipsométricas e integrales hipsométricas de la cuenca. Donde los valores de altitud de la cuenca oscilan desde los cero (0) m.s.n.m hasta los 2.446 m.s.n.m.

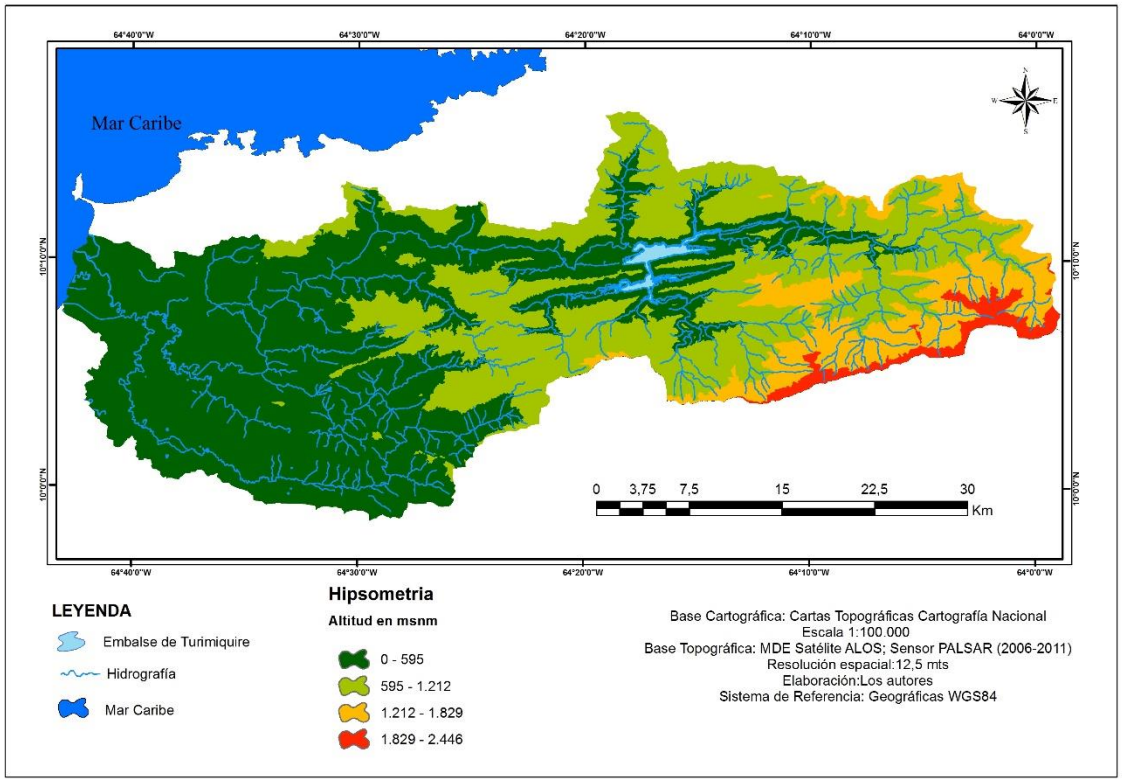

Figura 07 - Mapa Hipsométrico de la cuenca del río Neverí

Derivado de los valores de altitud de la cuenca del río Neverí, se presenta unos rangos de pendiente que van desde 0% a mayores que 45%, lo cual resulta en un relieve escarpado en la parte alta y media de la cuenca y que se va disipando en la parte baja.

En la Figura 8 se muestra el mapa de rangos de pendiente, los cuales fueron establecidos según el comportamiento de este atributo dentro de la cuenca. Los rangos establecidos van de: 0 a 15%; 15% a 45% y superiores a 45%.

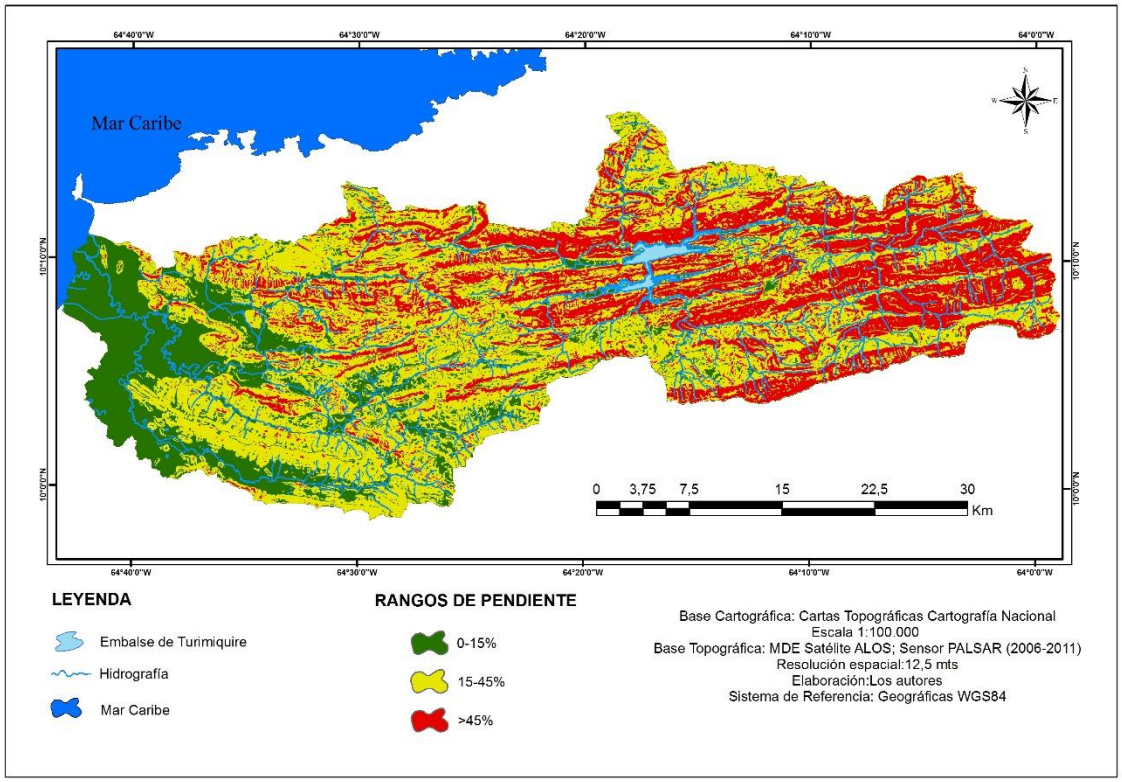

Figura 08 - Mapa de pendientes en la Cuenca del Río Neverí

El análisis de la curvatura tanto en plano como en perfil de la cuenca se ve reflejado en la Figura 9, donde se evidencia el comportamiento de las laderas de vertiente a lo largo y ancho de la cuenca como resultado del relieve derivado por hipsometría y la pendiente, estimulado por la dinámica de un balance erosivo y de las fuerzas tectónicas presentes.

La mayor parte de la cuenca se encuentra representado por una dinámica de laderas de vertiente donde la forma es determinada por perfiles cóncavos-convexos y planos convergentes, lo cual beneficia la densidad de drenaje (alta energía) presente. Mientras que en su parte baja a consecuencia de la respuesta de la hipsometría y la pendiente (donde hay disminución de los valores de estos atributos) la dinámica de laderas de vertiente se ve influenciada por perfiles cóncavos-convexos y planos divergentes, donde hay una disminución de la energía y favoreciendo los procesos de acumulación y sedimentación

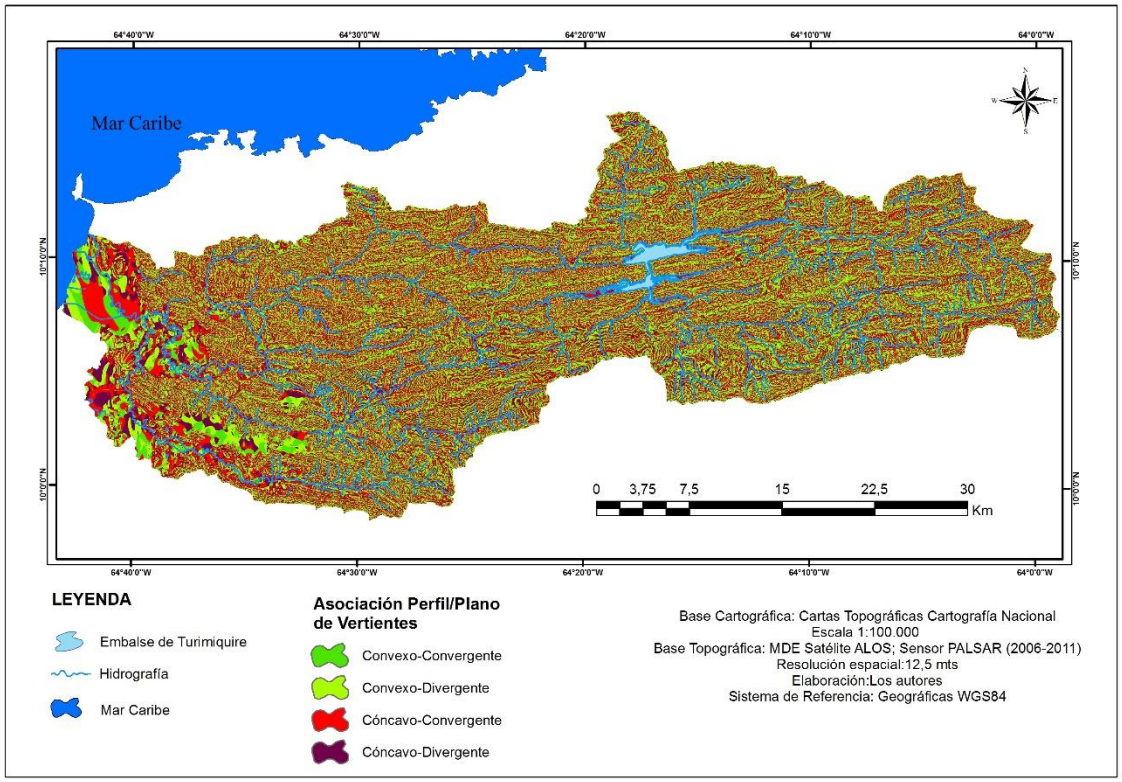

Figura 09 - Mapa de Asociación de Perfil y Plano de Vertientes en la Cuenca del Río Neverí.

El análisis de las características morfométricas de la cuenca permitió la clasificación en siete (7) unidades geomorfológicas (Ver Figura 10). La Tabla I muestra las áreas y el porcentaje de las unidades presentes en la cuenca del río Neverí y la Figura 3 muestra las unidades geomorfológicas en la cuenca.

Tabla 1 - Áreas y porcentajes de las unidades geomorfológicas de la cuenca hidrográfica del río Neverí

Unidad	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Unidad I	8.366,56	6,08
Unidad II	36.916,43	26,81
Unidad III	28.702,03	20,85
Unidad IV	14.838,14	10,78
Unidad V	18.304,27	13,30
Unidad VI	19.299,45	14,02
Unidad VII	11.244,22	8,17

Fuente: Elaborado por los autores

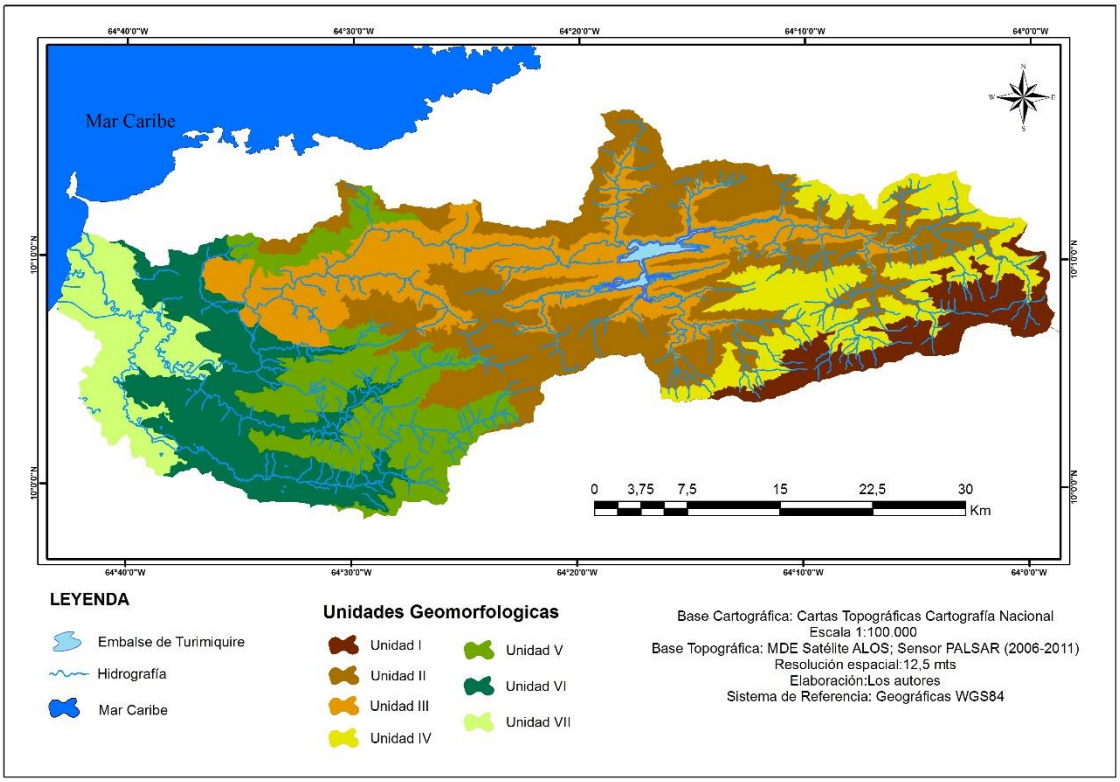

Figura 10 - Mapa de unidades geomorfológicas en la cuenca del Río Neverí

3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES

UNIDAD I

La unidad I, situada en la parte sureste de la cuenca, cuenta con un área de 8.366,56 ha, que representa 6,08% de la superficie total. Consta de las áreas superiores a los 1.500 metros altitud en la cuenca, con rangos de pendiente que van 15%-a 45% y superiores al 45% constituyendo las crestas y pendientes abruptas con predominio de laderas de vertiente cóncavas-convergentes y convexas-convergentes.

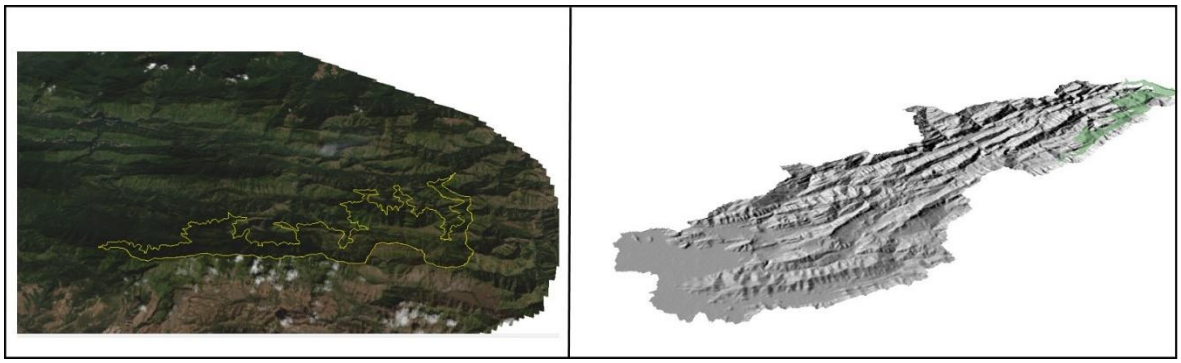

Figura 11 - Localización de la Unidad I en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011)

UNIDAD II

Contiene un área de 36.916,43 ha, que representa 26,81% de la superficie total de la cuenca del río Neverí, ocurre predominantemente en las nacientes en el curso medio. La unidad se caracteriza por unas formas

montañosas dominadas por la tectónica presente y fuertemente marcadas por pendientes escarpadas que van 15% a 45%, formando crestas con valores de altitud hasta 1.000 metros y laderas de vertiente muy pronunciadas con predominio de vertientes cóncavas-convergentes y una amplitud de 500 metros.

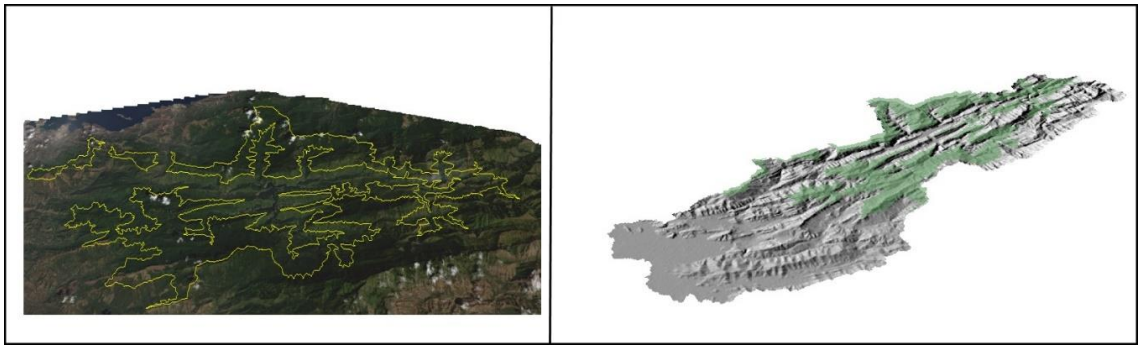

Figura 12 - Localización de la Unidad II en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011)

UNIDAD III

La unidad III tiene una superficie de 28.702,03 ha, lo que representa 20.85% de la superficie total de la cuenca. Se encuentra presente en la parte central y media de la cuenca, las altitudes que se presentan pueden llegar hasta 1.000 metros. La pendiente predominante en la unidad es superior al 45%, las vertientes se caracterizan por ser cóncavas-convergentes con secciones falladas, por tanto, las formas de relieve se encuentran controladas por la tectónica y representadas por colinas escarpadas, valles encajados y alineados conforme a los esfuerzos producidos por los controles tectónicos.

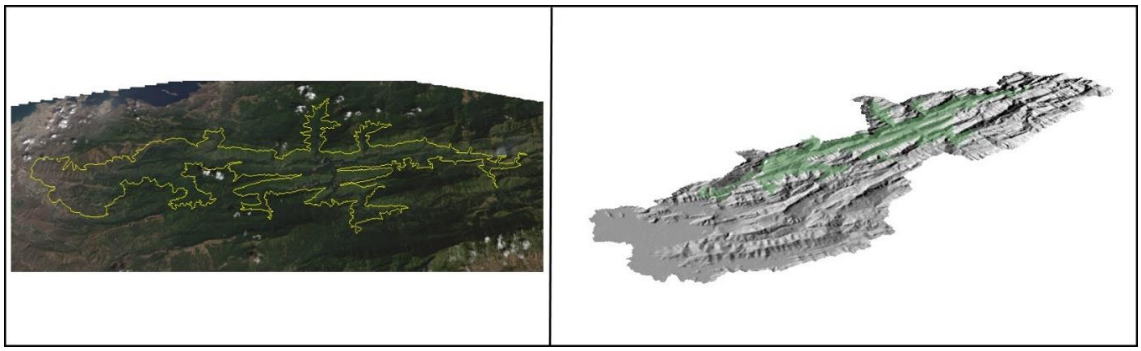

Figura 13 - Localización de la Unidad III en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011)

UNIDAD IV

Se encuentra presente en la parte sur y norte de la región oriental de la cuenca corresponde a un área de 14,838.14 ha, con 10,78% de la superficie total. El relieve está representado por pendientes inclinadas con valores que van de 15%-45% y superiores a 45%, y entre altitudes hasta los 1.500 metros. Las vertientes se caracterizan por tener predominio de forma convexa-divergente y cóncava-convergente. Estas condiciones generan la presencia de crestas y picos donde se encuentran presentes las cabeceras actuales de los canales de drenaje que fluyen hacia los valles cerrados en la unidad III.

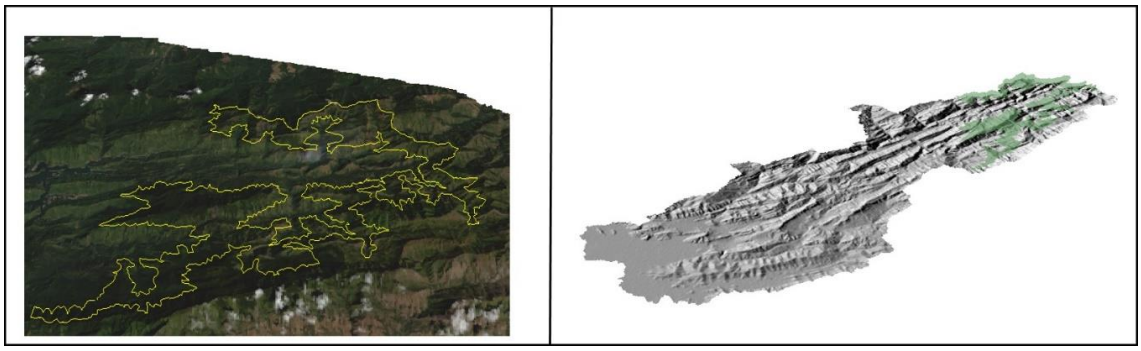

Figura 14 - Localización de la Unidad IV en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011).

UNIDAD V

La unidad V se encuentra representada en la parte occidental de la cuenca, tiene una superficie de 18.304,27 ha, lo cual representa el 13,30% de la superficie total. La altitud en la presente unidad llega hasta 1.000 metros con una amplitud de 900 metros, las pendientes van de 15%-45% y vertientes predominantemente convexas-divergentes y cóncavas-convergentes. Es una zona de transición entre las formas de relieve escarpado y formas planas, formas que se representan por el relieve ondulado que se inclina fuertemente.

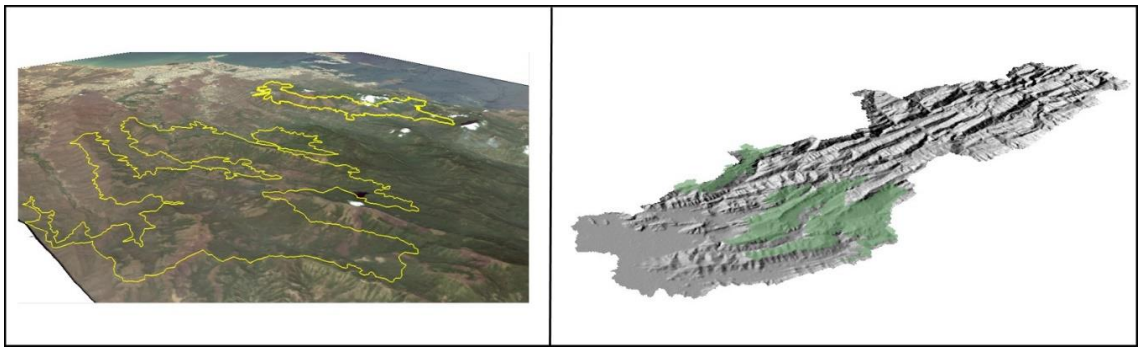

Figura 15 - Localización de la Unidad V en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011)

UNIDAD VI

La unidad VI se encuentra situada en la parte occidental de la cuenca, conformada por porciones con altitudes inferiores a los 500 metros, con pendientes comprendidas en el rango 15%-45% y donde predominan las vertientes convexo-convergente y cóncavo-divergente y presentando vertientes amplias. Forma un relieve con colinas y cuestas topos redondeados, además de presentar secciones de hogback. Tiene una superficie 19.299,45 ha con 14,02% de la superficie total. En esta unidad existe la presencia de procesos agradacionales que se caracterizan por el depósito de sedimentos que provienen de las partes superiores de la cuenca.

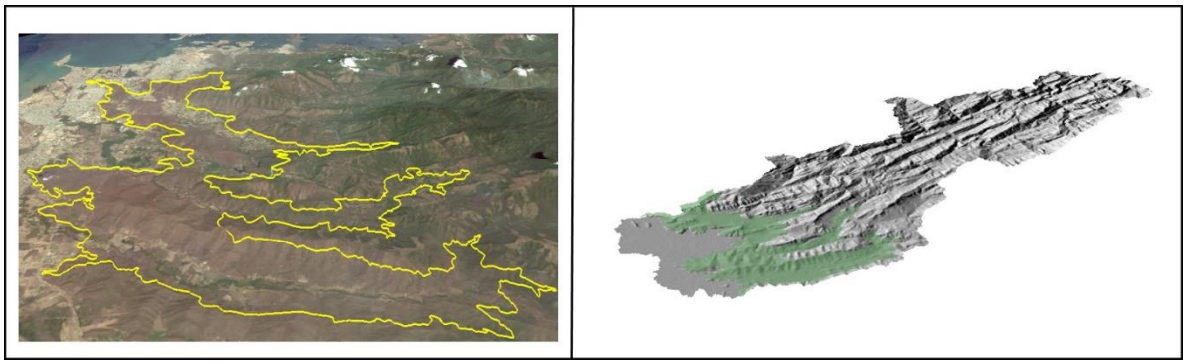

Figura 16 - Localización de la Unidad VI en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011).

UNIDAD VII

La unidad VII está en el extremo oeste de la cuenca en la desembocadura del río Neverí. Constituye una de las principales zonas con pendientes suaves y planas, con altitudes que van desde cero (0) y 100 metros y pendientes inferiores al 5%. Los procesos son en su mayoría representados por las inundaciones agradacionales representados por depósitos de la planicie aluvial en las zonas más bajas influenciados por acción de las mareas.

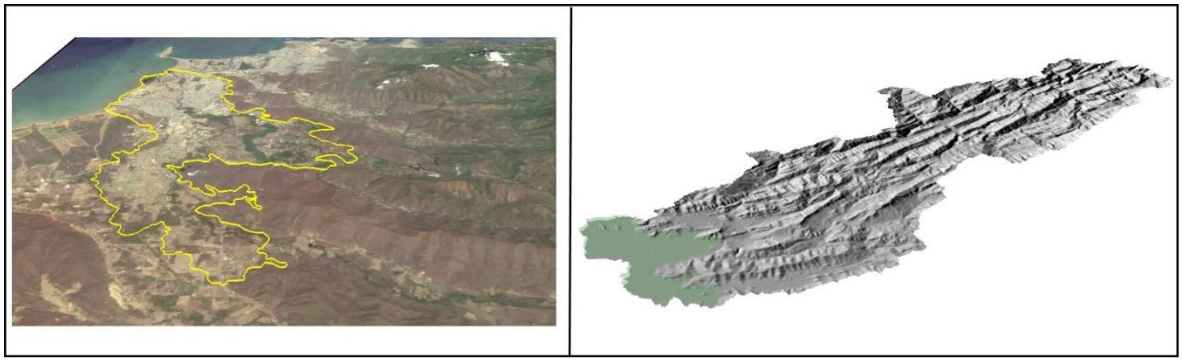

Figura 17 - Localización de la unidad VII en el contexto de la cuenca. Fuente: Imagen Landsat 8 con fecha de 16 de enero de 2016 y sombreado de relieve generado a partir MDE ALOS-PALSAR (JAXA, 2006-2011)

Cuando se subdivide la cuenca en parte alta media y baja como se mencionó anteriormente, la respuesta de las curvas hipsométricas describe de qué manera se comportan los volúmenes de masa presentes en estas porciones y de esta manera dar pie a las formas de relieve presentes con características específicas de hipsometría, pendiente y curvatura de las laderas de vertiente entre los principales atributos topográficos considerados para clasificar en unidades geomorfológicas.

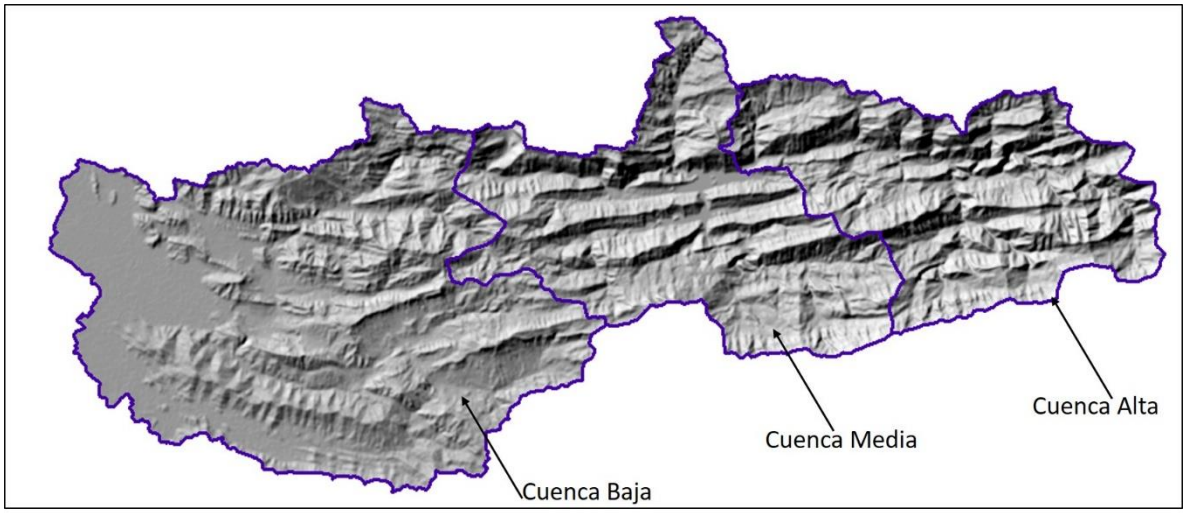

Figura 18 - Subdivisión de la cuenca del Río Neverí. Fuente elaborado por los autores mediante MDE ALOS/PALSAR (JAXA.2006-2011).

Al presentar una tentativa de establecimiento de relaciones entre las curvas hipsométricas y las unidades geomorfológicas delimitadas se tiene lo siguiente:

Cuenca Alta (Cabeceras del río Neverí), conformada por la presencia de las unidades geomorfológicas IV, III, II y I respectivamente. La respuesta de la integral hipsométrica corresponde con la fase de madurez de los volúmenes de masas presentes en las partes altas, por tanto, el sistema hidrográfico se encuentra en un estado de equilibrio en lo que respecta al balance de erosión y las fuerzas tectónicas que dan origen a las formas de relieve presentes en el área. La curva hipsométrica de la etapa de equilibrio es una expresión del logro de un estado estacionario en los procesos de erosión y transporte dentro del sistema fluvial y sus pendientes contribuyentes (Strahler, 1952). En este estado se ha desarrollado un sistema de pendientes de canales y valles que se adapta con mayor eficacia a la reducción de la masa terrestre con fuerzas erosivas disponibles, equilibradas con las fuerzas resistivas de cohesión mantenidas por la roca madre, el suelo y la cubierta vegetal. Las cuencas ya no se están expandiendo en el área; están en contacto con cuencas similares.

Cuenca Media (embalse de Turimiquire y otros afluentes), contiene parte de las unidades geomorfológicas III, II, IV y I. El valor obtenido de la integral hipsométrica la cuenca comienza a pasar a una fase senil (vejez), donde se presentan las formas de relieve más desarrolladas. En esta etapa de senectud corresponde a la fase final de desarrollo de los ciclos de erosión de cada uno de los procesos geológicos presentes, según las premisas de la Teoría de Davis.

Cuenca Baja: contempla porciones de las unidades geomorfológicas VI, VII, V, III y II. En estas zonas se caracterizan por presentar relieves peniplanizados, los cuales se caracterizan por ser superficies planas o levemente onduladas, estas son el resultado de procesos geológicos erosivos. La integral hipsométrica en la parte baja de la cuenca refleja la etapa de senectud y la forma de la curva refleja equilibrio entre la estructura geológica y la resistencia de la roca a la erosión. Este equilibrio resulta como consecuencia de la perdida de energía dentro del sistema hidrográfico debido a procesos de acumulación y sedimentación dentro de la cuenca.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Los estudios dinámicos y cuantitativos de los atributos topográficos generados a partir de modelos digitales de elevación requieren en primer lugar, un análisis morfológico y de esta manera los elementos que forman el paisaje pueden ser separados y cuantitativamente descritos, así como pueden ser comparados de una región a otra.

La red de drenaje, sus características, la pendiente, la curvatura de perfil y plano, y sus propiedades hipsométricas se encuentran entre las clases generales de información morfológica para las cuales se deben establecer medidas estandarizadas y de esta forma poder entender las diferencias esenciales y las semejanzas entre regiones.

El uso de atributos topográficos resulta eficaz en la delimitación de las unidades geomorfológicas mediante la clasificación semi automática de las características físicas del medio y la relación directa de la altitud, la pendiente y la forma de las laderas de vertientes con diversas técnicas de geoprocesamiento. Por lo tanto, permitió la división de la cuenca del río Neverí en siete (7) unidades geomorfológicas definidas por los procesos dinámicos y modelado de la superficie (erosión en la cuenca alta y media y la sedimentación en las partes bajas de la misma).

El desempeño de la aplicación del interpolador Topo to Raster, el cual se encuentra disponible como una herramienta en la aplicación ArcMap versión 10.1 (ESRI, 2013) permitió la obtención de un modelo digital de elevación corregido hidrológicamente con datos provenientes del MDE ALOS/PALSAR y la hidrografía en formato vectorial proveniente del Proyecto PITSA-II (1998) donde se mejora la calidad MDE.

La clasificación obtenida responde satisfactoriamente a características geomorfológicas reconocidas en la región.

5.REFERENCIAS

ALARCÓN, F., CAICEDO, G. Diferenciación de los Sedimentos Cuaternarios y su Caracterización Geotécnica cualitativa, en un sector de Puerto La Cruz, Municipio Sotillo, Estado Anzoátegui. INGEOMIN. 2010

ARNSTEIN, R., SÁNCHEZ, H., RUSSOMANNO, F., CABRERA, E. (1985). Revisión Estratigráfica de la Cuenca de Venezuela Oriental. En A. R. Espejo (Ed.), VI Congreso Geológico Venezolano. Tomo I, págs. 41-69. Caracas: Sociedad Venezolana de Geólogos.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfología. 2. ED. SÃO PAULO: EDGARD BLUCHER, 1980.188P

ESRI. ArcGIS, Spatial Analyst, 3d Analyst. Versão 10.1 Environmental Systems Research Institute, 2013.

MATTOS, S. H. V. L. DE; FILHO, A. P. Complexidade e estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema. Revista Brasileira de Geomorfologia, P. 11–18, 2004.

GUADAGNIN, P. M. A.; TRENTIN, R. Compartimentação geomorfométrica da bacia hidrográfica do arroio Caverá-RS. Geouerj, Rio De Janeiro, V.1, N. 25, P. 183-199, 2014. DISPONIBLE EN: <http://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/10030/9928>. acceso en: 14 ago. 2016

HENGL, T. Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches. 2003. Phd thesis. Wageningen university, Enschede,. 233p. - Wageningen university.disponível en:

http://spatial-analyst.net/wiki/index.php?title=pedometric_mapping:_phd_thesis acceso en: 20 jan. 2017.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. Proceedings Of The IEEE, N. 69, V. 01, P. 14-47, 1981

IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. Automated classifications of topography from dems by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature.Geomorphology 86(3-4): 409-440, 2007.

JÁCOME, M. (2002). Modelado geodinámico de la serranía del interior oriental y la cuenca de maturín. (S. V. GEÓLOGOS, ED.) XI CONGRESO VENEZOLANO DE GEOFÍSICA, 1-10.

JAPAN AEROSPATIAL AGENCY. Earth Observation Research. ALOS Mission.2006-2011. Disponible en: http://www.eorc.jaxa.jp/en/index.html

LUO, W. (1998): hypsometric analysis with a geographic information system. COMPUTERS & Geosciences, 24: 815- 821.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES (MARNR) Plan De Conservación De La Cuenca Alta Y Media Del Río Neverí. Informe Ejecutivo. Caracas. Venezuela. 2001

PETRÓLEO DE VENEZUELA S.A.- INTEVEP (PDVSA-INTEVEP) (2007) código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela. [libro en línea]

disponible: http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm acceso en: 29 oct 2016

PÉREZ-PEÑA, J. V., AZAÑÓN, J. M., & AZOR, A. (2009). CALHYPSO: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. Computers & Geosciences, 35(6), 1214-1223.

REINOZA, G. CARLOS E. High resolution geodetic gnss surveys of the present day deformation along the south-caribbean margin. Implications for earthquake hazard assessment in western and north-eastern Venezuela. Earth Sciences. Phd Thesis Université Grenoble Alpes, 2014.

REPUBLICA DE VENEZUELA. Ministerio de Agricultura y Cría. PROYECTO DE GENERACIÓN DE ORTOFOMAPAS A ESCALA 1:25.00 PITSA-II 1998.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. Revista do Departamento De Geografia, São Paulo, V. 6, P. 17-29, 1992. Disponible em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47108/50829>. Acceso en: 12 SEPT. 2016

SILVEIRA, R.M.P., SILVEIRA, C.T. Analise digital do relevo aplicado a cartografia geomorfológica da porção central da serra do mar paranaense. Revista Brasileira de Geomorfologia. V.17, N.4, P.615-629,2016.

STRAHLER, A.N.: Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63: 1117-1142. 1952

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. As unidades de relevo como base para a compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do rio itu – oeste do rio grande do sul. IN: 9º Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2012, Rio De Janeiro/RJ. ANAIS. RIO DE JANEIRO/RJ: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2012.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S.; SILVEIRA, C. T. DA. Compartimentação geomorfométrica da bacia hidrográfica do rio ITÚ/RS Geomorphometric compartmentation of river basin ITU/RS Revista Brasileira de Geomorfologia. V. 16, N. 2, P. 219-237,2015

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8. Disponible en: <http://landsat.usgs.gov/>. Acceso en: 30 ene. 2016

WOOD, J. The Geomorphological Characterisation Of Digital Elevation Models. Leicester, Uk, Phd Thesis 1996. 185p. - University Of Leicester.Disponível en: http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd.