Tabla 4 Información usada en la generación del modelo de visualización

Cobertura	Fecha de Registro	Característica
Fotografías Aéreas	19 de enero de 1956	Sin nubosidad, cobertura de la zona de estudio de 85% escala aproximada de la toma 1:30.000
	8 de febrero de 1959	Sin nubosidad, cobertura de la zona de estudio de 80% escala aproximada de la toma 1:30.000
	10 de diciembre de 1980	Sin nubosidad, cobertura de la zona de estudio de 50% escala aproximada de la toma 1:18.400
	5 de marzo de 1992	Sin nubosidad, cobertura de la zona de estudio de 60% escala aproximada de la toma 1: 20.000
SPOT 4	29 de enero de 2007	SPOT Pancromática 5% de nubosidad, resolución espacial 10 m, resolución espectral 0,61-0,68 µm Espectral 5% de nubosidad, resolución espacial 20 m, resolución espectral 0,5 a 1,75 µm cuadro bandas
DEM SRTM	-----	Resolución espacial 30x30 metros
DEM ASTER	30 de enero de 2004	Resolución espacial 30x30 metros
DEM curvas de nivel	-----	Extracción de cartografía básica análoga a escala 1:25.000 de las planchas 190 IIB, 190IVB, 190IVD,191IC y 191IIA. Interpolación de curvas de nivel. Remuestreado para una resolución espacial 30x30 metros

4.5 Evaluación del modelo de visualización

Para la evaluación del modelo de erosión, se realizó una comparación entre las unidades de suelos del estudio de Boyacá (IGAC, 2005), con los resultados obtenidos de la investigación que se propone. Los parámetros que se compararon fueron la pendiente, la forma de la pendiente y el grado de erosión. Además, para el modelo de visualización se realizó verificación y comparación con el estudio de suelos y trabajo de campo en una zona piloto del área de estudio, para determinar la exactitud temática y mostrar los diferentes escenarios en el manejo de la erosión.

A continuación se muestra el resumen de las características principales de cada unidad cartográfica de suelos, para realizar la evaluación del modelo (Tabla 5)

Tabla 5 Características de las unidades cartográficas de suelos de área de estudio

UCS	Pendiente (%)	Forma de la Pendiente	Erosión (Grado y tipo)	Área (km^2)	Porcentaje (%)
AHEf2	50-75	Irregular	Ligera a moderada, Laminar	7,8	4,56
AHVd1	12-25	Irregular	Ligera, laminar	3,5	2,02
AHVd2	12-25	Irregular	Ligera, laminar, remociones en masa	10,7	6,20
AHVe2	25-50	Irregular	Ligera, laminar, remociones en masa	6,8	3,96
AHVf3	50-75	Irregular	Moderado, surcos, remociones en masa	12,7	7,38
AMVd3	12-75	Irregular	Ligera a moderada, surcos	3,9	2,29
MGEg3	>75	Irregular	Moderada, surcos	0,3	0,20
MHEe2	25-50	Irregular	Ligera, laminar	4,2	2,46
MHEf3	50-75	Convexa	Moderada, surcos	31,5	18,27
MHVd2	12-25	Recta	Ligera, laminar	11,7	6,81
MHVf3	50-75	Recta	Moderada, surcos	13,0	7,56
MLEg3	>75	Irregular	Moderada, surcos	3,8	2,18
MMCd2	12-25	Recta	Ligera, laminar	5,8	3,36
MMCe2	25-50	Recta	Ligera, laminar	7,2	4,19
MMCf3	50-75	Recta	Moderada, surcos	1,9	1,09
MMAg3	>75	Irregular	Moderada, surcos	2,7	1,54
MMEd2	12-25	Irregular	Ligera, laminar	2,2	1,29
VMAa	1-3	Plana	No observada	19,8	11,49
VMBa	1-3	Plana	No observada	1,9	1,13
CA	-	-	-	2,3	1,35
ME	-	-	Muy severo	18,4	10,68
			Total	172,1	100

Fuente:IGAC, 2005

Para determinar el progreso o amortiguación de la erosión se determinó la tasa de avance entre las fechas de registro (1956, 1980 y 2009) de acuerdo a las categorías de riesgo . La tasa de cambio en el riesgo en dos fechas está dada por:

$$TC_{ij} = \frac{RE_{atj} - RE_{ati}}{T_j - T_i} \qquad Si \begin{cases} TC > 0; incremento\ de\ áreas\ al\ \ riesgo \\ TC < 0;\ reducción\ de\ áreas\ al\ \ riesgo \\ TC = \ 0; \text{sin}\ \ cambio\ de\ área\ \ al\ riesgo \end{cases} \qquad \textbf{(11)}$$

TC_{ij} = tasa de cambio en la Clase de riesgo (cambio de un área en periodo de tiempo)
*RE_{at} =riesgo a la erosión en la clase **a** (ligero, moderado, alto, muy alto y extremo) y **t** tiempo de las fechas comparadas.*
T tiempo de las fechas comparadas y esta de i, j y k (1956, 1980 y 2009)

Para predecir las modificaciones posteriores a 2009, se realizó una estimación tasa de cambio por año en el periodo de 1956 a 2009; obteniendo series de datos de 54 años para realizar la modelación en escenario de conservación y sin tomar medidas de control esta estimación está dado por:

$$at_{0(ij)} = REi\,; \quad At_{1(ij)} = t_{0(ij)} + TC_{ij}\,; \; At_{2ij} = t_{2-1(ij)} + TC_{ij} \; \ldots\ldots\ldots\ldots \; At_{n(ij)} = At_{n-1(ij)} + TC_{ij} \quad \textbf{(12)}$$

Siendo

$at_{0(ij)}$ es el área en riesgo a la erosionada en año cero (1956).
$At_{n(ij)}$ es el área en riesgo a la erosionada en año n (n= 1 ….. 53) y ij son la fechas de comparación 1980 y 1956 y jk para 2009 y 1980.

4.6 Uso del modelo

El uso del modelo de visualización, permitió determinar las zonas de riesgo a la erosión en sus diferentes grados, y su proyección estableció los cambios que sufre el paisaje al realizar alguna práctica de conservación, o permitir la degradación de los suelos por procesos naturales y antrópicos. Adicionalmente, se estableció las relaciones de los habitantes en su entorno geográfico del área de estudio, para decidir las acciones para las prácticas de conservación ambiental.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Estadísticas Básicas de los MDE

En la Tabla 6, se pueden ver las estadísticas descriptivas de la variable elevación para los tres MDE. La media de la elevación es similar en los tres modelos (2.977 m), aunque en MDE ASTER presenta una elevación máxima de 3.623 m respecto al MDE de curvas de nivel que es de 3.585 m y MDE SRTM que es de 3.593 m, con una diferencia entre estos modelos de 38 y 30 metros respectivamente, dado a la exageración vertical que presenta el modelo ASTER, caso contrario en los modelos curvas de nivel y SRTM, solo presentan una diferencia de 8 metros lo cual se considera baja (Nikolakopoulos *et al.*, 2006; Kamp *et al.*, 2005). Adicionalmente MDE SRTM presenta la menor elevación (2.457 m) en comparación a los otros MDE ASTER (2.481 m) y curvas de nivel (2.460 m), con una diferencia entre el ASTER de 24 metros y con el modelo de curvas de nivel de solo 3 metros. Esta variable muestra una similitud entre el modelo curvas de nivel y SRTM.

Tabla 6 Estadísticas descriptivas de la elevación de las diferentes fuentes de información

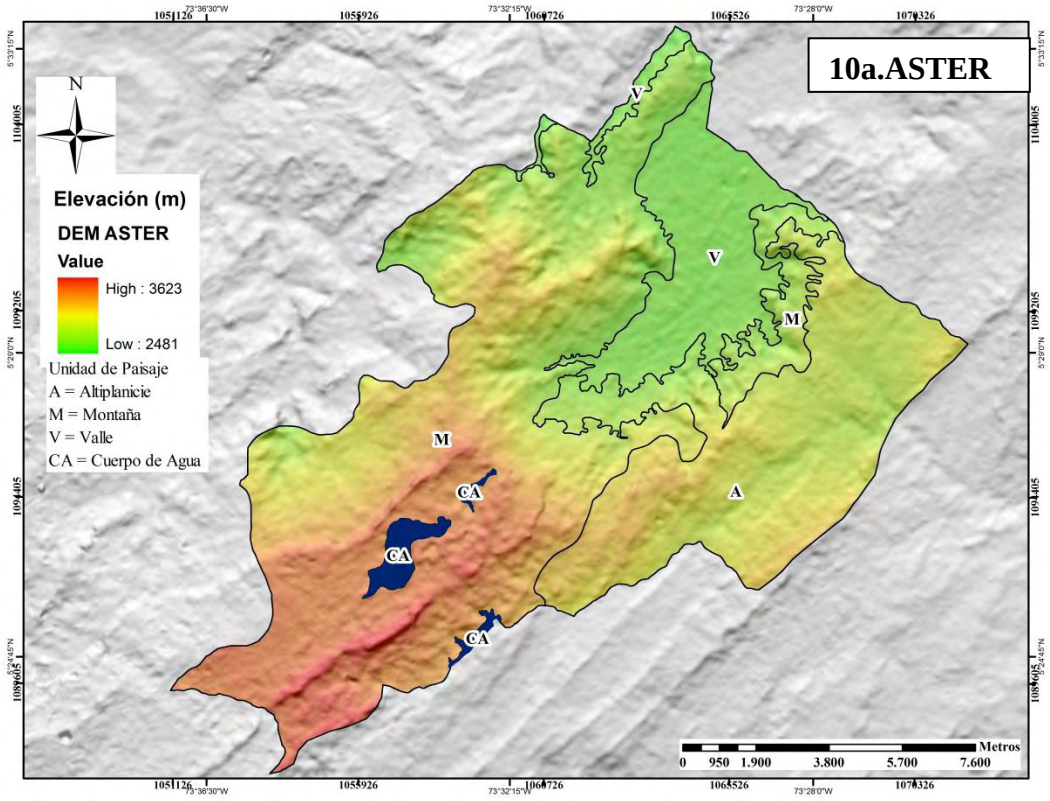
	Elevación (m)				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	2977	3623	2481	269,70	0,09
Curvas de Nivel	2977,3	3585	2460	268,14	0,09
SRTM	2976,7	3593	2457	268,93	0,09

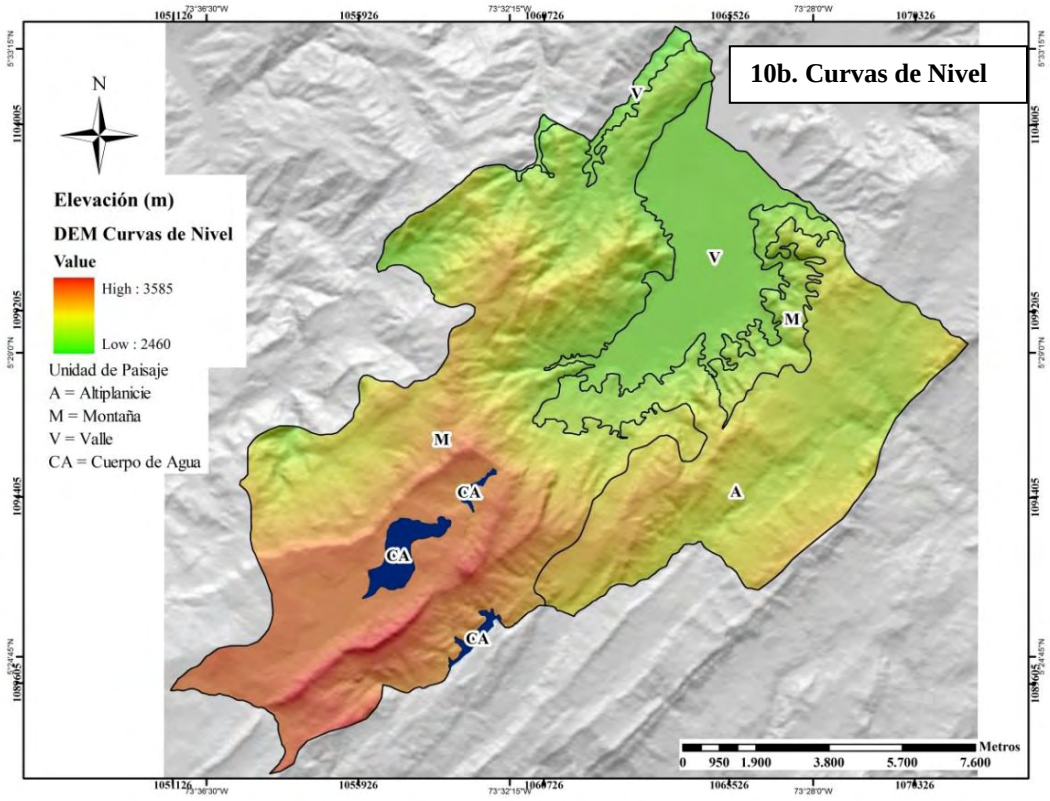
DS: Desviacion Estándar

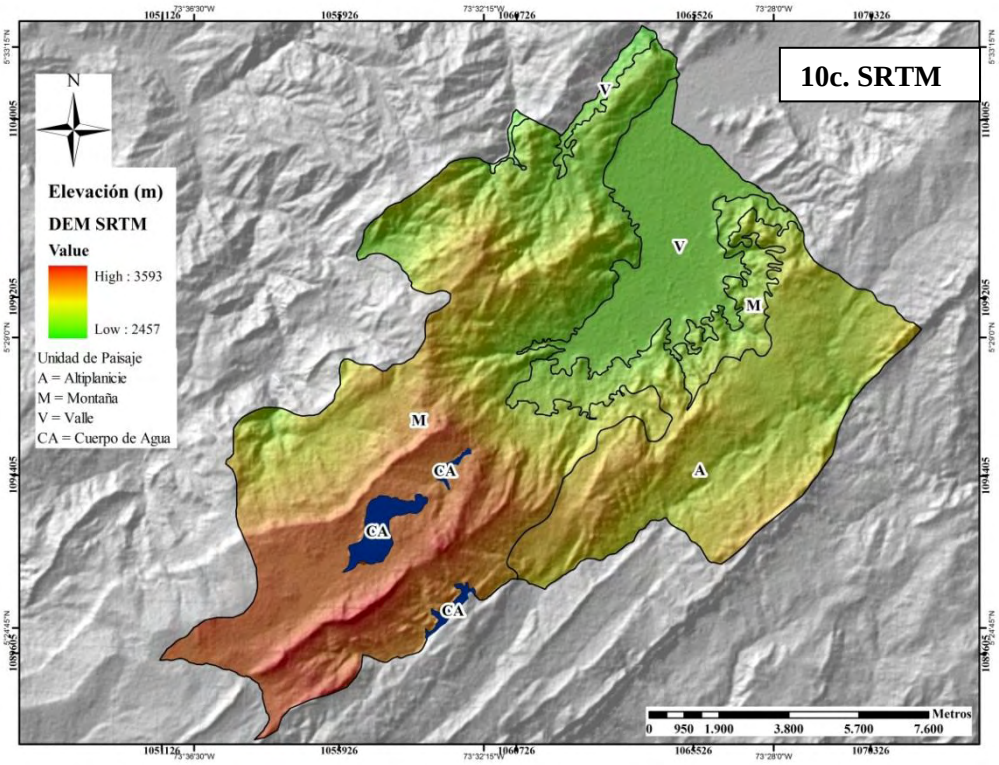
CV: Coeficiente de Variación

En las Figuras 10 se muestran los mapas de elevación utilizando los tres MDE. Se observa que el modelo ASTER (Figura 10a) presenta mayores variaciones en las alturas por mostrar menor exactitud vertical,(Huggel *et al.*, 2008), en las diferentes unidades de paisaje. El modelo de curvas de nivel (Figura 10b) y SRTM (Figura 10c) presentan una similitud en la distribución de la elevación en sus unidades de paisaje; aunque se puede observar algunas diferencias para las zona de valle, donde el modelo de curvas de nivel presenta menor variación en elevación.

Figura 10 Elevación para los diferentes MDE







Se observa que la representación del relieve es más exacta en el modelo SRTM, mientras que los otros modelos presentan variaciones de las formas locales del relieve, generando diferencias en el cálculo de los parámetros geomorfométricos.

En la Tabla 7 se observan las estadísticas descriptivas para la pendiente de los tres MDE. Los modelos ASTER y SRTM (45,25 y 46,0 respectivamente) muestran valores bajos, comparado con el modelo de curvas de nivel (47,0); sin embargo el modelo de curvas de nivel, presenta su media menor (10,62), respecto a los modelos ASTER (13,16) y SRTM (11,65). El promedio alto del modelo ASTER, se puede explicar por la exactitud vertical del modelo, y en el caso del promedio bajo del modelo curvas de nivel por presentar mayores zonas planas.

Tabla 7 Estadísticas descriptivas para la pendiente en diferentes fuentes de información

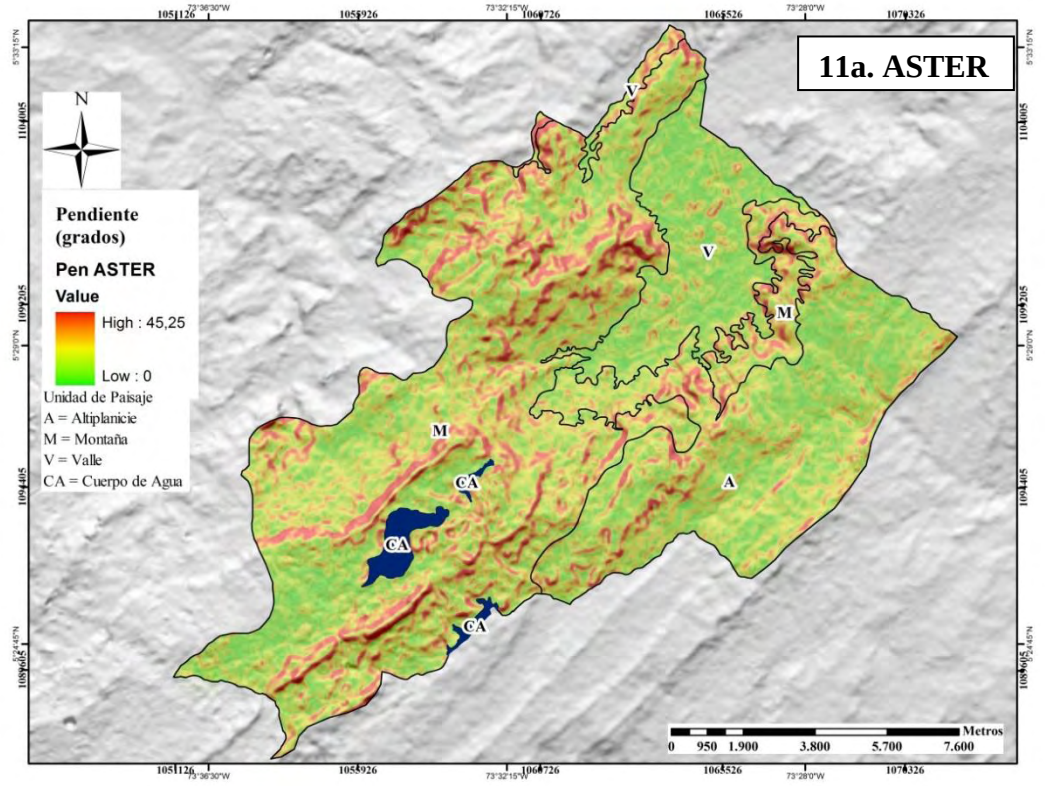
	θ *(grados)*				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	13,16	45,25	0,00	8,09	0,61
Curvas de Nivel	10,62	47,00	0,00	7,82	0,74
SRTM	11,65	46,00	0,00	7,56	0,65

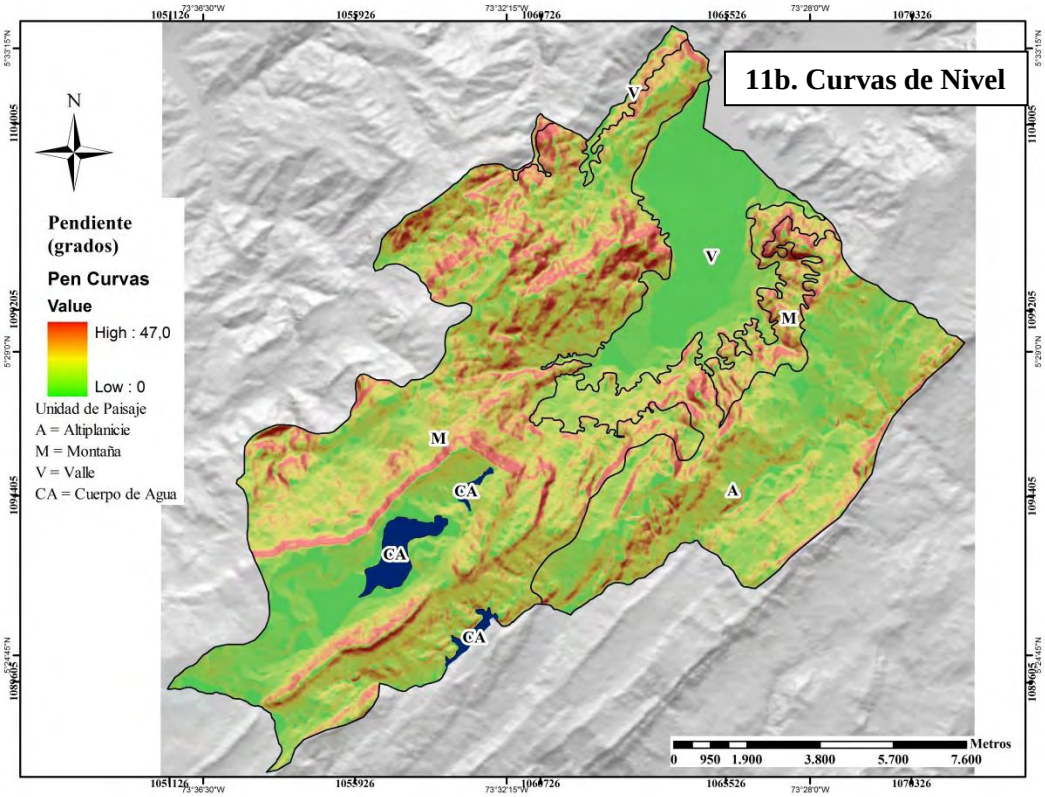
DS: Desviacion Estándar

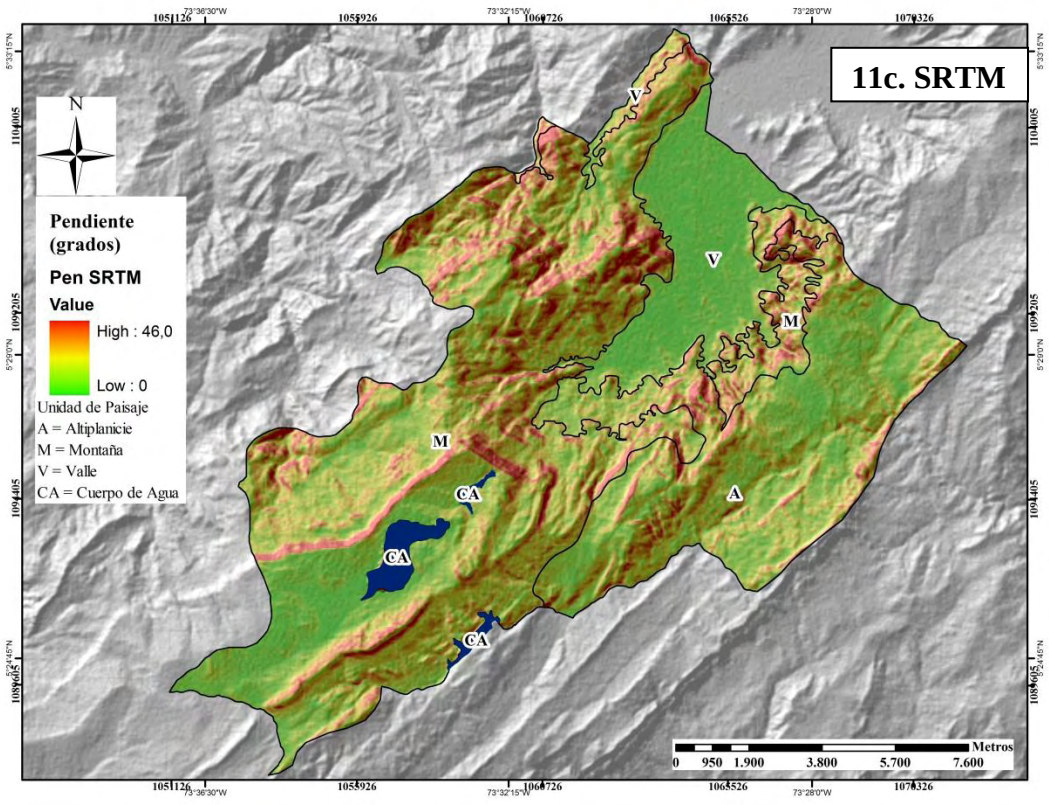
CV: Coeficiente de Variación

En las Figuras 11, se presenta el resultado del cálculo de las pendientes para los diferentes MDE. La mayor diferencia entre los MDE en relación a la pendiente ocurre en la zona plana. El modelo ASTER (Figura 11a), presenta mayor heterogeneidad dentro del valle, lo cual hace que represente una irregularidad del terreno, además muestra áreas con un grado de pendiente cercano 45°, lo cual puede sobreestimar erosión en este paisaje. El modelo de curvas de nivel (Figura 11b), exhibe en el paisaje de valle pendientes bajas, sin embargo Kamp *et al* (2005), hallaron que el MDE de curvas de nivel ofrece baja exactitud en el cálculo de la pendiente en comparación con el ASTER y SRTM, por la distancia entre su curvas para realizar la interpolación. El modelo SRTM (Figura 11c) muestra pequeñas variaciones de la pendiente en el valle, sin sobre estimar como el modelo ASTER y subestimar como en el curvas de nivel. En los demás paisajes (altiplanicie y montaña) los tres modelos tienen un comportamiento similar.

Figura 11 Pendiente para los diferentes MDE







En la Tabla 8 se muestran las estadísticas descriptivas de la curvatura horizontal para los tres MDE. Los valores positivos indican zonas convexas y los valores negativos zonas cóncavas. La curvatura horizontal que presenta mayor claridad las formas cóncavas y convexas, que son la de acumulación de sedimentos en los modelos SRTM (-0.014) y ASTER (-0.0045). Los valores obtenidos son similares, aunque fueron mayores para los modelos SRTM y ASTER, indicando que estos modelos permiten determinar con claridad la formas cóncavas y convexas del terreno.

Tabla 8 Estadísticas descriptivas de la Curvatura horizontal para los tres MDE

	$C_H\ (m^{-1})$				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	-0,0045	3,80	-3,80	1,44	----
Curvas de Nivel	0,0057	2,80	-2,80	0,25	43,31
SRTM	-0,014	4,00	-4,00	1,74	----

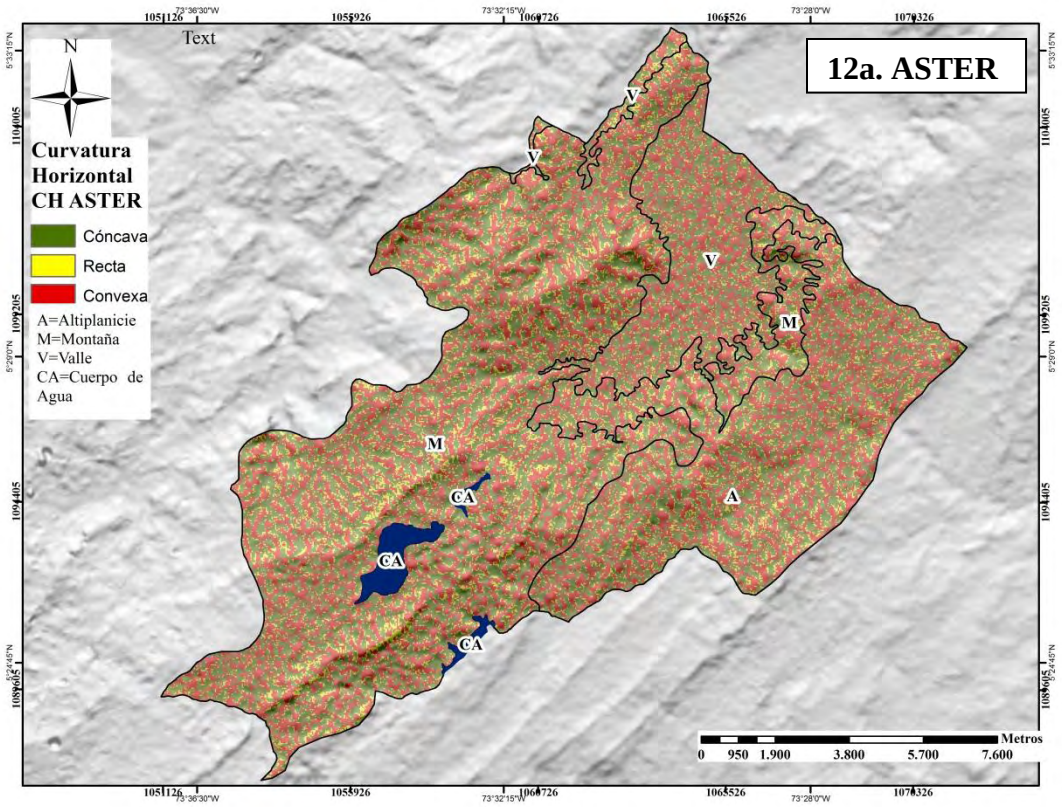
DS: Desviacion Estándar

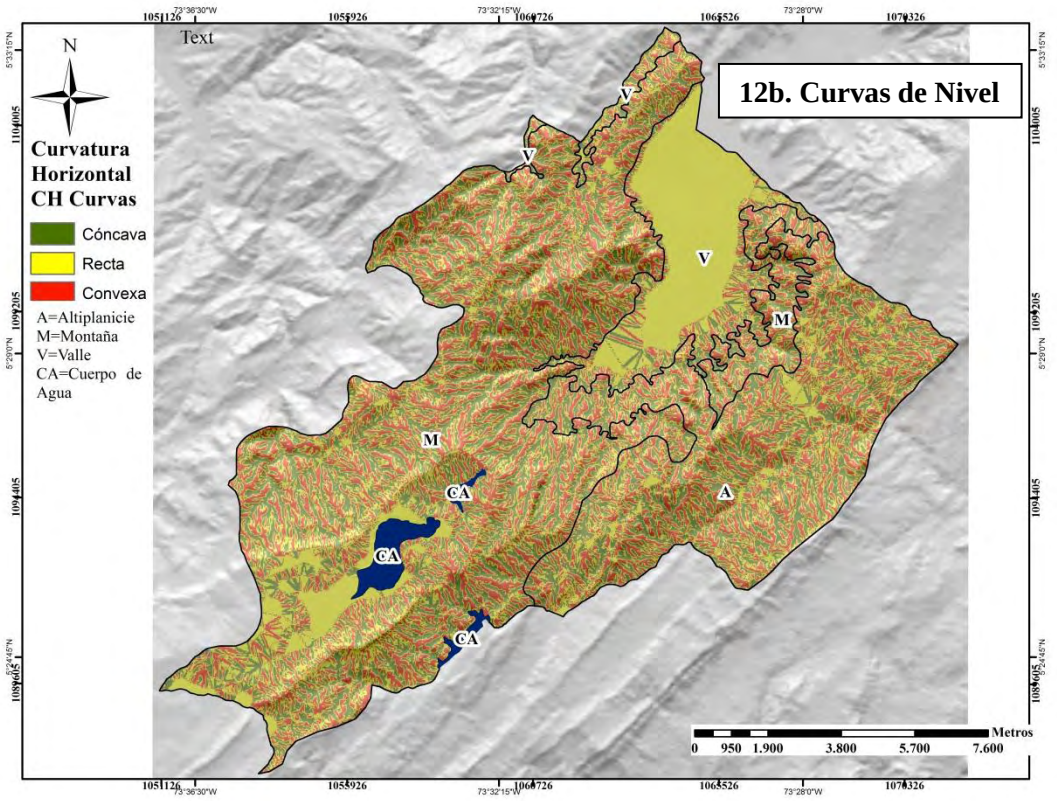
CV: Coeficiente de Variación

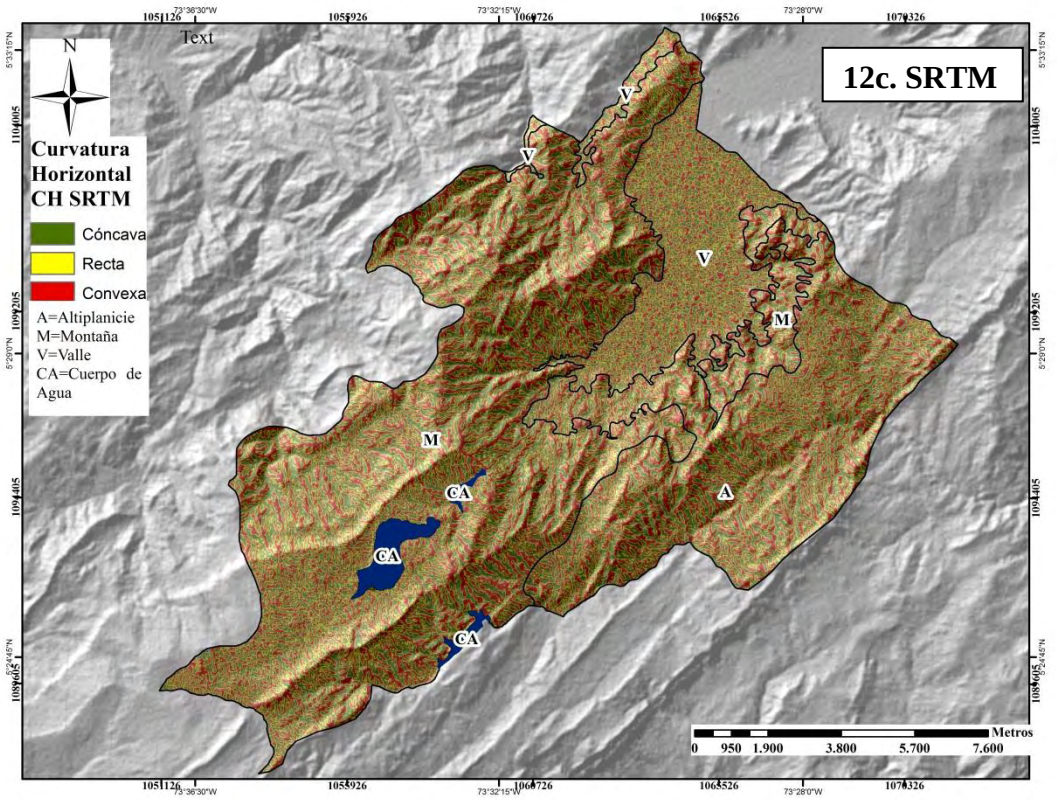
Aunque las estadísticas básicas analizadas en los tres modelos son similares, se pueden observar en algunas zonas diferencias importantes que se presentan en las Figuras 12. El modelo ASTER (Figura 12a) presenta una mayor visibilidad de las formas del terreno en el valle, en cambio el modelo de curvas de nivel (Figura 12b) se muestra homogéneo y el modelo SRTM (12c) evidencia una representación intermedia. En la altiplanicie y la montaña se observa mayor similitud en los tres modelos. Munar (2010) sugiere que el modelo SRTM con una resolución de 30metros capta con mayor detalle las zonas de divergencia y convergencia de flujos, lo cual puede observarse las delineaciones de las zonas de canales (convergen flujos) y zonas de crestas (divergen flujos) en la Figura 12c. Además López (2006) sugiere el uso de un MDE de 30 de resolución para evitar pérdida de información de la curvatura horizontal.

La curvatura cóncava horizontal implica mayor convergencia de flujo hídrico, facilitando el transporte de materiales por la acumulación del flujo, mientras que convexa horizontal índica divergencia del flujo incidiendo en la dispersión de flujo, teniendo menor efecto en la erosión (Olaya, 2008).

Figura 12 Curvatura horizontal para los diferentes MDE




12b. Curvas de Nivel
Text
N
Curvatura Horizontal CH Curvas
Cóncava
Recta
Convexa
A=Altiplanicie
M=Montaña
V=Valle
CA=Cuerpo de Agua
V
M
A
CA
Metros
0 950 1.900 3.800 5.700 7.600


12c. SRTM
Text
N
Curvatura Horizontal CH SRTM
Cóncava
Recta
Convexa
A=Altiplanicie
M=Montaña
V=Valle
CA=Cuerpo de Agua
V
M
A
CA
Metros
0 950 1.900 3.800 5.700 7.600

En la Tabla 9 se muestran las estadísticas de la curvatura vertical (C_V),con valores extremos de -1,5 y 1,5 en el modelo de curvas de nivel, mientras ASTER de -0,8 y 0,8 y SRTM de -1 y 1. Al observar la media, ASTER y SRTM muestran más zonas cóncavas (valores negativos), mientras que las curvas de nivel, exhibe zonas planas y convexas, aunque esto se puede explicar, debido a que en la zona de valle tiene valores positivos cercanos a cero.

Tabla 9 Estadísticas descriptivas para la curvatura vertical en diferentes fuentes de información

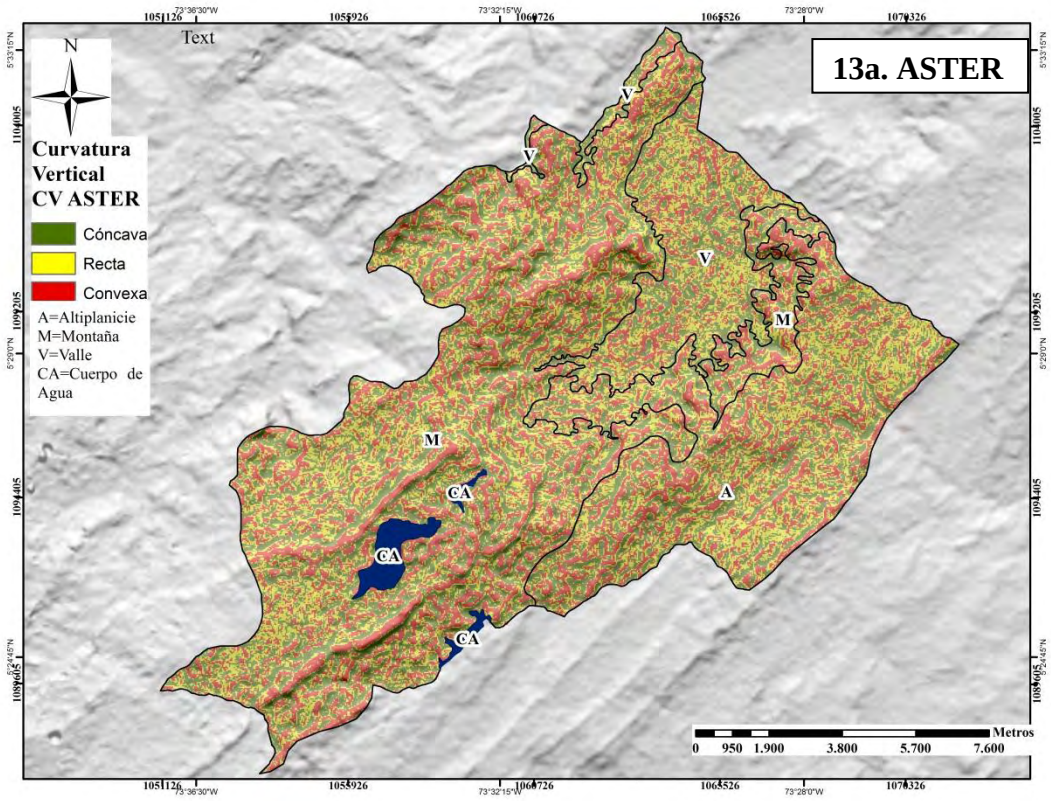
	$C_V\ (m^{-1})$				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	-0,0044	0,80	-0,80	0,23	----
Curvas de Nivel	0,0052	1,50	-1,50	0,28	53,88
SRTM	-0,008	1,00	-1,00	0,26	----

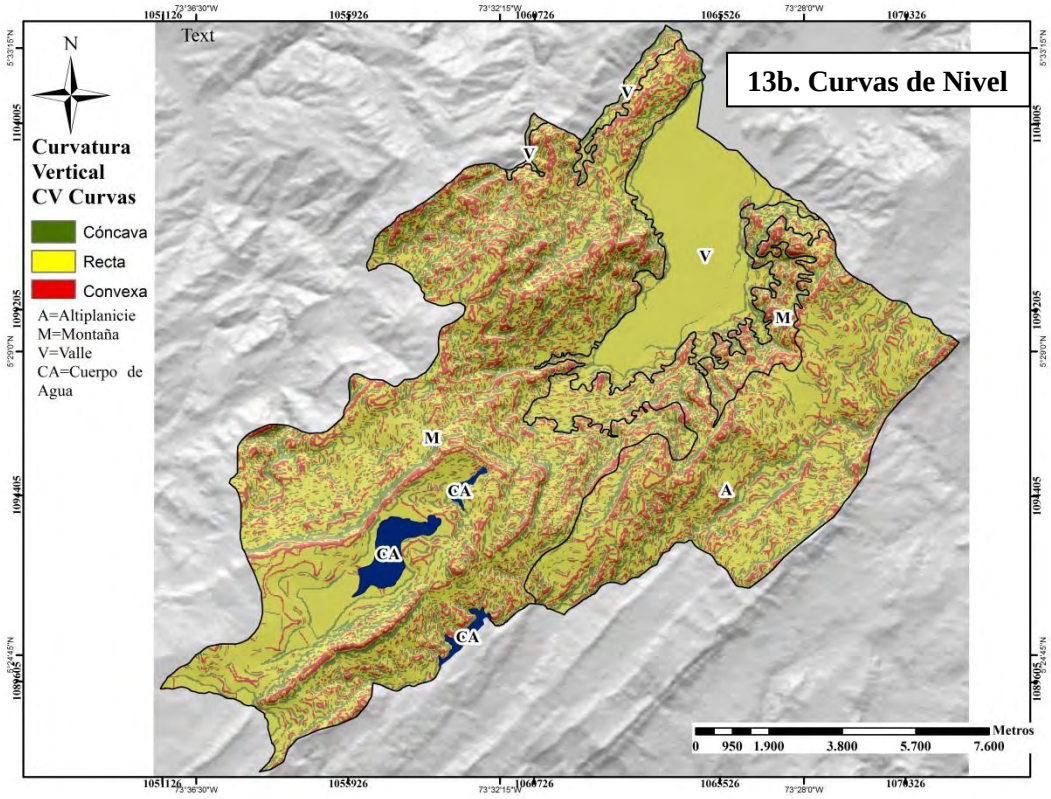
DS: Desviacion Estándar

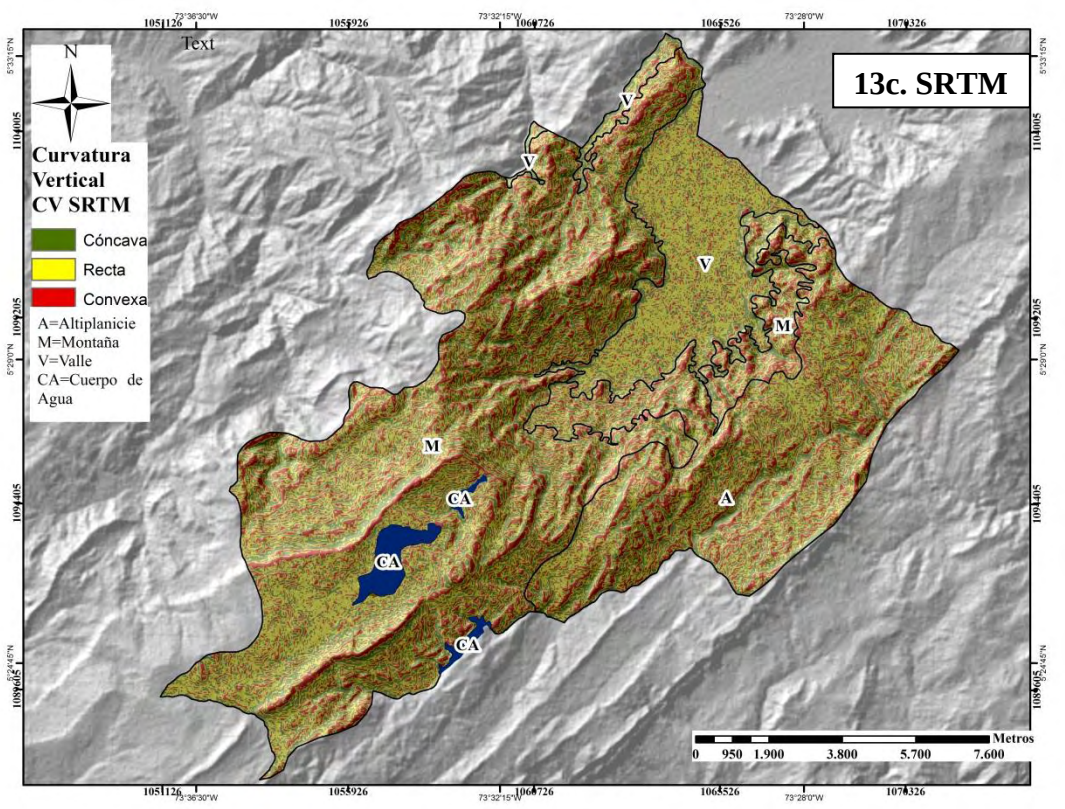
CV: Coeficiente de Variación

En las Figuras 13 se observan los mapas de la curvatura vertical, la que determina los cambios en el ángulo de la pendiente, por lo tanto controla la velocidad del flujo de una masa a lo largo de la ladera, teniendo una significancia en procesos erosivos y de sedimentación (Florinsky, 2008). La forma convexa implica una aceleración relativa de un flujo, por lo tanto mayor capacidad para el transporte de materiales, mientras la cóncava indica desaceleración relativa. El modelo ASTER (Figura 13a) muestra zonas convexas en la zona de valle, caso contrario con los modelos curvas de nivel (Figura 13b) y SRTM (Figura 13c).Todos los modelos exhiben áreas convexas en los paisajes de montaña y altiplanicie, diferenciándose picos y crestas. Además el modelo ASTER resalta con mayor detalle, zonas de canales o redes de drenaje en los tres tipos de paisaje, respecto a los otros dos modelos.

Figura 13 Curvatura vertical para los diferentes MDE







Las estadísticas básicas para el índice de capacidad de transporte de sedimentos (IC_{TS}) (Tabla 10) para los tres MDE, presenta valores similares en los tres modelos. El modelo de curvas de nivel presenta el índice más altos (20,5); comparado con los modelos ASTER (19,5) y SRTM (18,25), lo cual puede llevar a sobreestimar la susceptibilidad de la erosión. Este resultado coincide con lo reportado por Munar (2010) en la zona de la Mesa (Cundinamarca), en el cual el modelo de curvas de nivel tiene los valores más altos, dado que la longitud de la pendiente no representa con fidelidad el relieve, incidiendo en un aumento de la estimación que se haga de la erosión.

Tabla 10 Estadísticas descriptivas para el índice de capacidad de transporte de sedimentos para diferentes fuentes de información

	IC_{TS}				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	3,05	19,50	0,00	2,96	0,97
Curvas de Nivel	3,29	20,50	0,00	3,42	1,04
SRTM	2,98	18,25	0,00	2,78	0,93

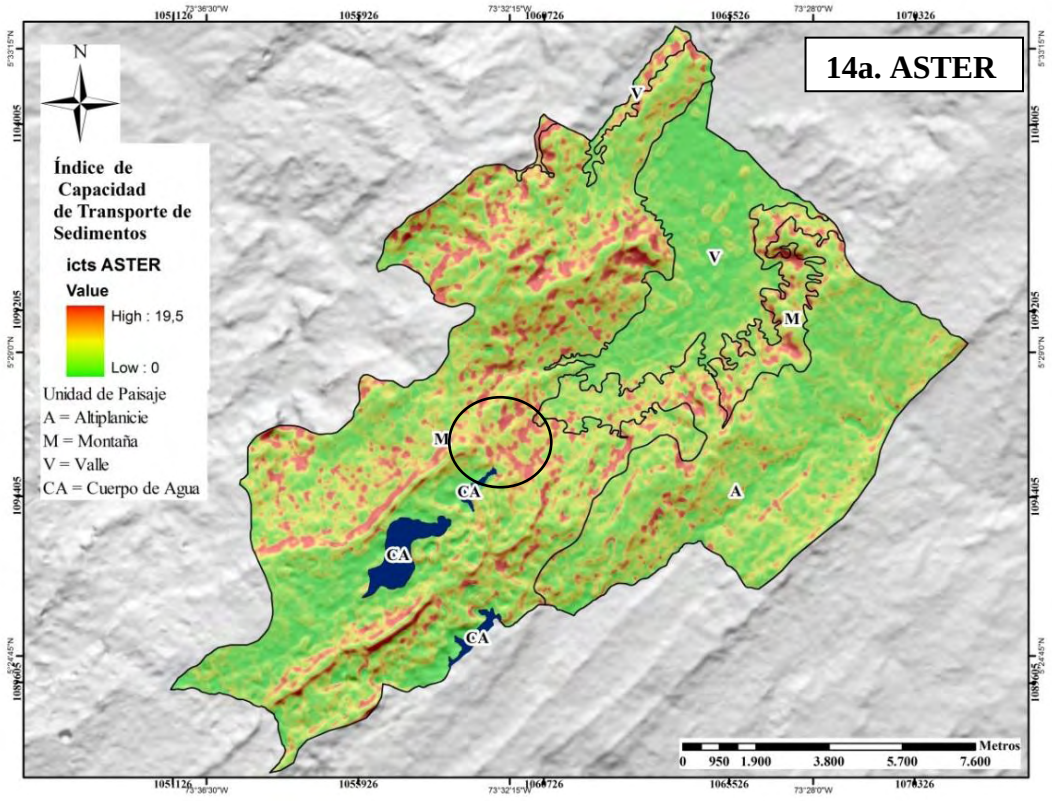
DS: Desviacion Estándar

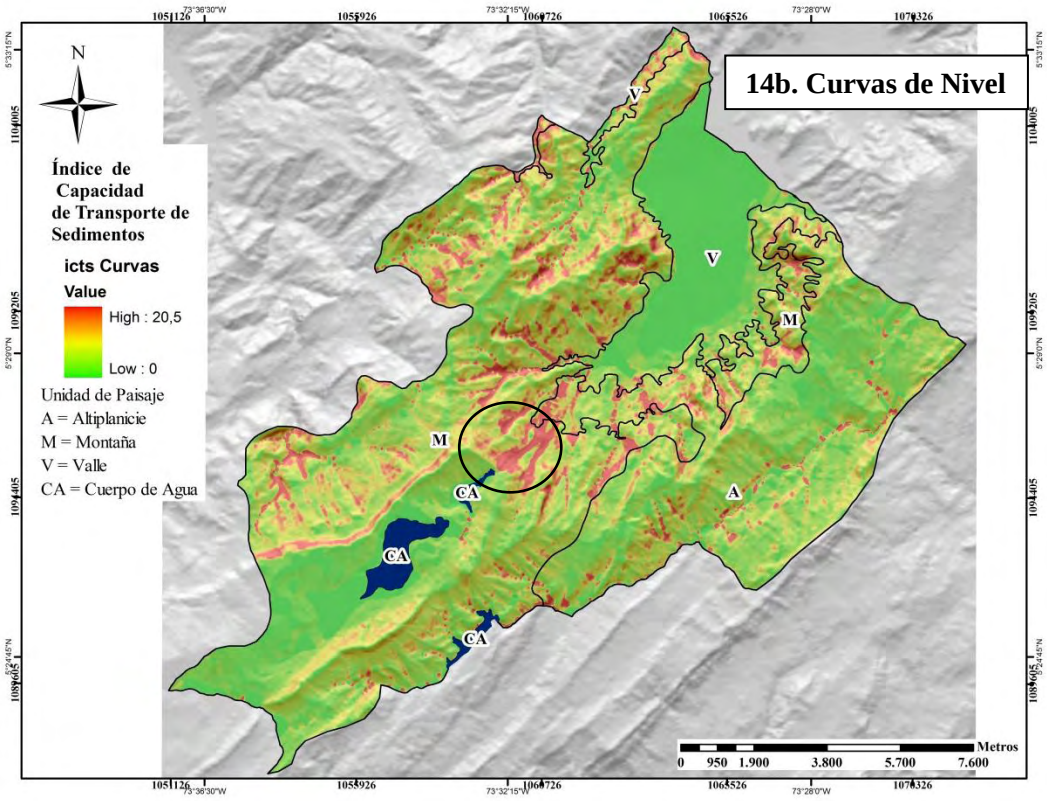
CV: Coeficiente de Variación

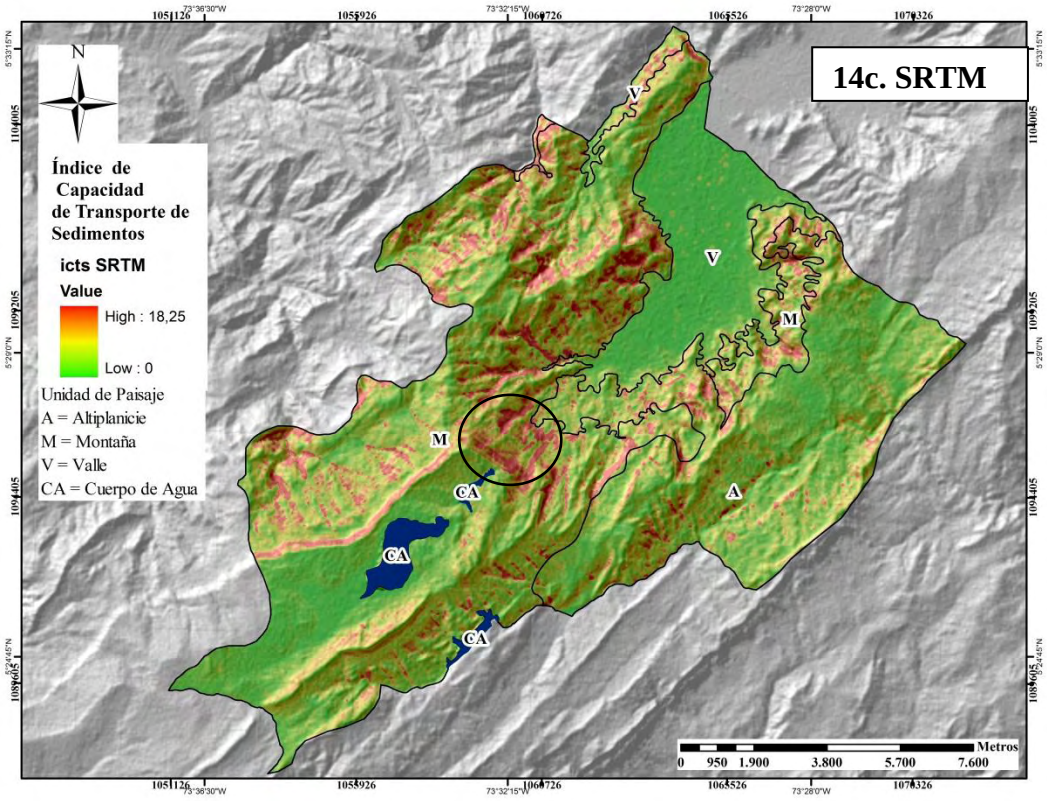
En las Figura 14 se observan los mapas del IC_{TS}, de las diferentes fuentes de datos, siendo evidente que en la áreas cercanas a los embalses (recuadro) se encuentran los valores más altos

de este índice. Los modelos ASTER (Figura 14a) y SRTM (Figura 14c) se notna con mayor claridad que los valores altos corresponde a las redes de drenaje y el modelo de curvas (14b) se observa mayor homogeneidad de la distribución espacial de este índice, posiblemente por las distancias en las cotas y el método de interpolación. El modelo curvas de nivel exhibe en la zona de valle valores cercanos cero de este índice, donde no muestra exactitud de este paisaje, ya que se presentan algunas variaciones de elevación.

Figura 14 Índice de capacidad de transporte de sedimentos para los diferentes MDE




14b. Curvas de Nivel
N
Índice de Capacidad de Transporte de Sedimentos
icts Curvas
Value
High : 20,5
Low : 0
Unidad de Paisaje
A = Altiplanicie
M = Montaña
V = Valle
CA = Cuerpo de Agua
V
M
A
CA
Metros
0 950 1.900 3.800 5.700 7.600


14c. SRTM
N
Índice de Capacidad de Transporte de Sedimentos
icts SRTM
Value
High : 18,25
Low : 0
Unidad de Paisaje
A = Altiplanicie
M = Montaña
V = Valle
CA = Cuerpo de Agua
V
M
A
CA
Metros
0 950 1.900 3.800 5.700 7.600

En la Tabla 11 se observan las estadísticas descriptivas del índice de poder de flujo (I_{PF}). El MDE de curvas de nivel presenta el máximo valor (1150) y la mayor media (147,16) respecto a los modelos ASTER (958 máximo y 78,44 media) y SRTM (1000 máximo y 89,79 mínimo); lo cual puede llevar a sobre estimar el poder potencial del agua dentro de un modelo de erosión, esto puede ser por las cotas que están más distantes en las partes altas, sobre todo en la zona de drenaje del embalse al valle (Tabla 8).

Tabla 11 Estadísticas descriptivas índice de poder de flujo en diferentes fuentes de información

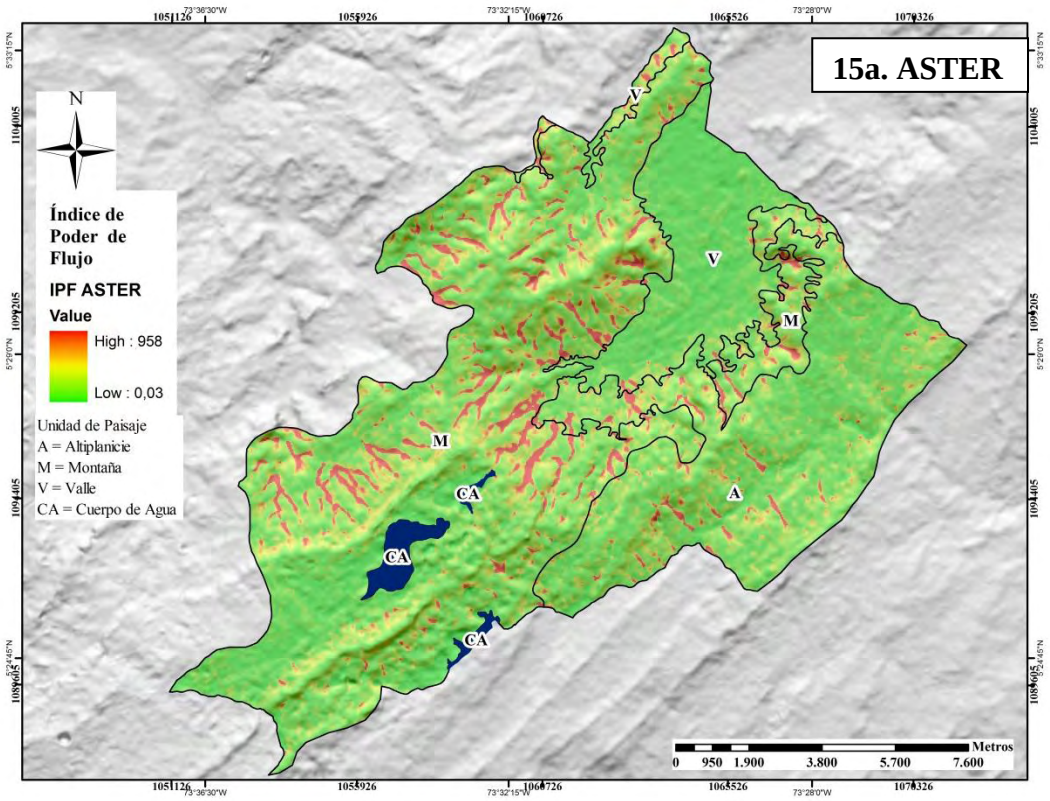
	I_{PF}				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	78,44	958,00	0,03	145,42	1,85
Curvas de Nivel	147,16	1150,00	0,03	268,18	1,82
SRTM	89,79	1000,00	0,03	165,45	1,84

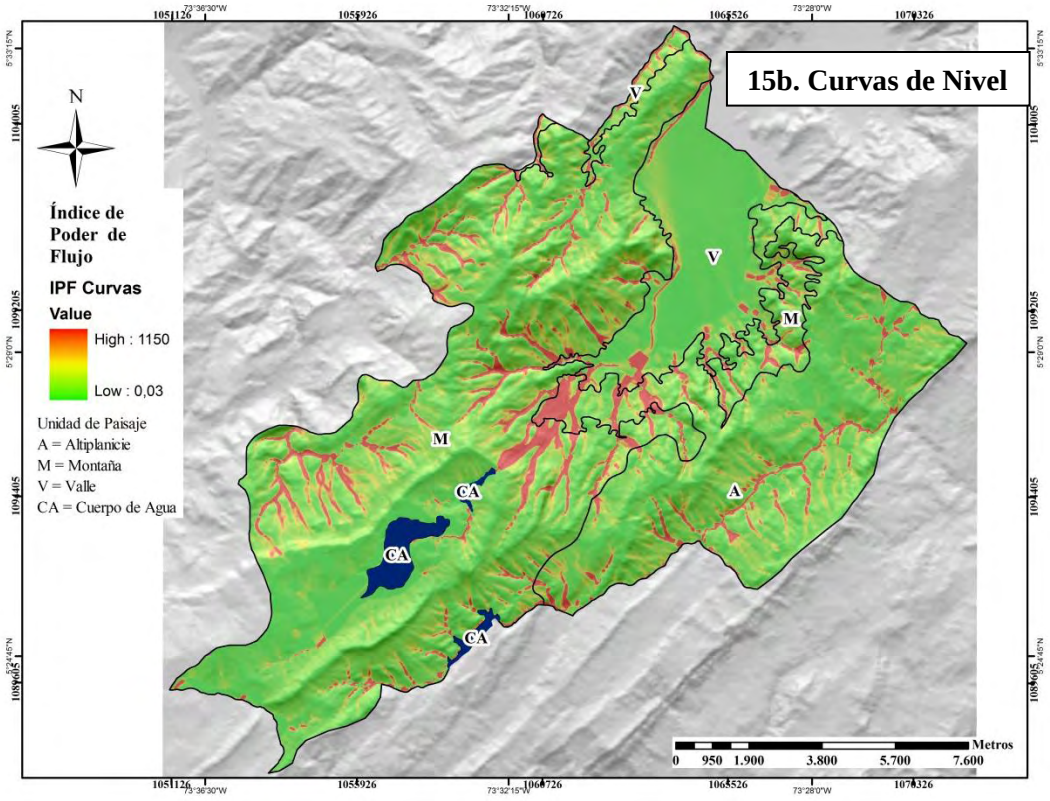
DS: Desviacion Estándar

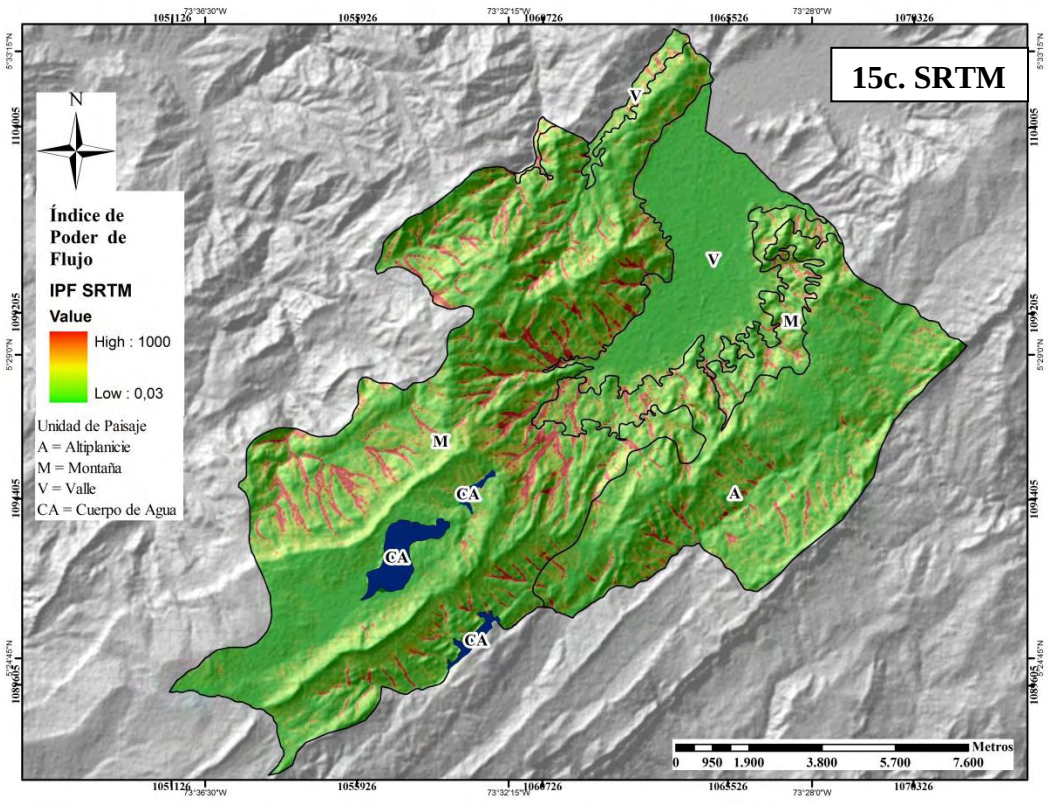
CV: Coeficiente de Variación

Los mapas I_{PF} para los diferentes modelos se muestran en las Figuras 15. En el caso de los modelos ASTER (Figura 15a) y SRTM (Figura 15c) no se presentan valores altos en el paisaje de valle, ni patrones atípicos como los presentados por el modelo de curvas de nivel (Figura 15b), observándose que el valle presenta una franja con un alto I_{PF}, sin seguir un patrón de una red de drenaje; esta diferencia se da por la separación entre las cotas en esta área, sobreestimando el valor de este índice. El I_{PF} tiene una relación con la formación de cárcavas, que se relaciona con el poder de una corriente de agua cuando ejerce mayor poder de arrastre. (Fernandez *et al*., 2008). Pallaris (1999) ha usado este índice para la erosión hídrica en la cuenca del rio Cabuyal (Cauca), aplicando variantes en su cálculo, denominándolo índice de degradación.

Figura 15 Índice de poder de flujo para los diferentes MDE







En la Tabla 12 se muestran las estadísticas del índice topográfico de humedad (I_{TH}), que describe la variabilidad espacial de la humedad del suelo. El modelo de curvas presenta el máximo valor de este índice (19,0), respecto a los modelos ASTER (15,0) y SRTM (13,0), además el valor mínimo del modelo de curvas de nivel es el más alto (4,09) respecto a los modelos ASTER (3,94) y SRTM (2,67).

Tabla 12 Estadísticas descriptivas índice topográfico de humedad en diferentes fuentes de información

	I_{TH}				
Fuente	Media	Max	Min	DS	CV
ASTER	7,20	15,00	3,94	1,62	0,23
Curvas de Nivel	8,70	19,00	4,09	3,26	0,37
SRTM	7,36	13,00	2,67	1,64	0,22

DS: Desviacion Estándar

CV: Coeficiente de Variación

En las Figuras 16 se muestran los mapas del I_{TH}. El modelo ASTER (Figura 16a) se muestra mayor área de baja acumulación en el valle, contrario a lo que ocurre en el modelo de curvas de nivel (Figura 16b) y SRTM (Figura 16c). En la montaña y la altiplanicie, la mayor área de baja acumulación se presenta en el modelo curvas. Estas variaciones están relacionadas con el grado de la pendiente y el área específica de drenaje, esto permite inferir que el modelo más cercano a la realidad es el modelo SRTM. Al igual como lo reporta Munar (2010), el modelo de curvas de nivel presenta algunas distorsiones en las zonas planas para este índice.

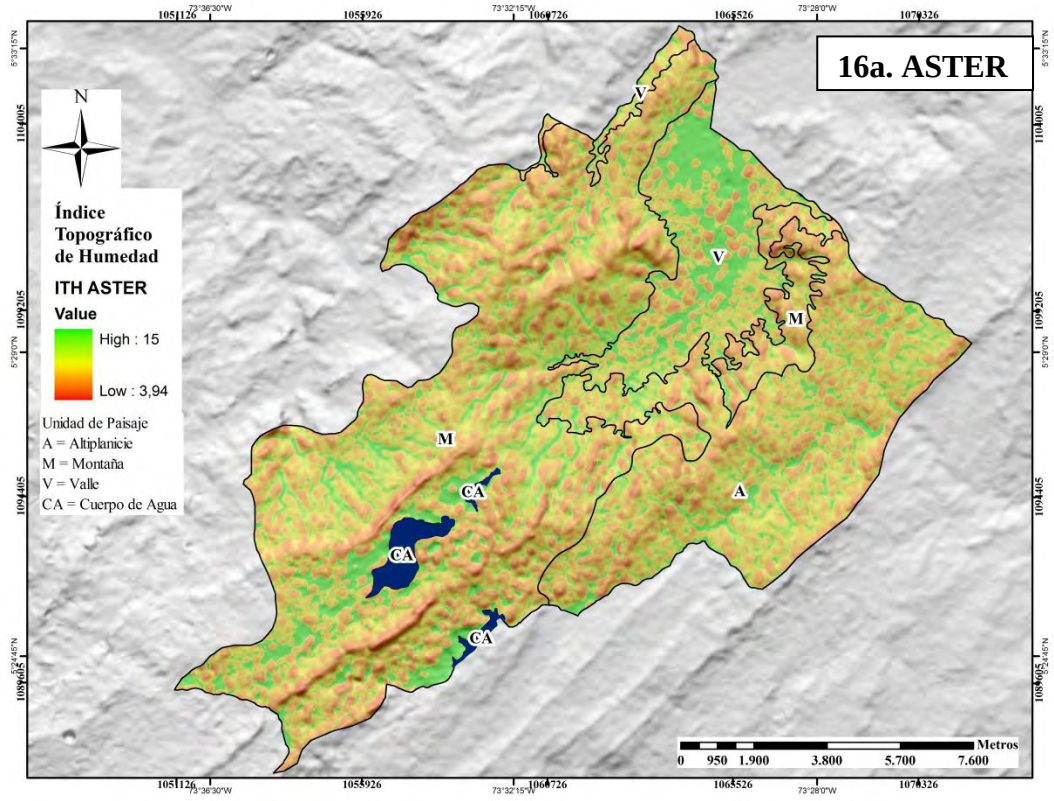



Figura 16 Índice topográfico de humedad para los diferentes MDE