

Evaluación cuali-cuantitativa de la erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, estado Mérida-Venezuela

Quali-Quantitative soil erosion evaluation in Aguas Calientes watershed, Merida State-Venezuela

Mejía Joel¹, Dal Pozzo Franceso¹, Montilla Publio² y Torres Geovanny²

Recibido: marzo 2009 / Aceptado: noviembre, 2009

Resumen

Se evaluó la erosión actual, potencial y del riesgo de erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, combinando métodos paramétricos y análisis espacial en un SIG. El modelo paramétrico de Albaladejo (1988) permitió evaluar cualitativamente el riesgo de erosión en entidades espaciales homogéneas, mientras que la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), facilitó estimar el riesgo de erosión actual y potencial. Se definieron 23 Unidades Homogéneas de Erosión (UHE) y se evaluó, cualitativa y cuantitativamente, la erosión en cada una de ellas. Las UHE indican la alta variabilidad espacial de la erosión, influenciada sobre todo por la cobertura vegetal. La erosión actual demuestra un predominio del rango de erosión ligera, debido a la notable influencia del factor C-USLE; pero también existen sectores con acentuadas pendientes, con inminente riesgo de erosión fuerte. En la microcuenca predomina una erosión potencial fuerte debido al factor topográfico, por lo que el factor cobertura vegetal adquiere gran relevancia como agente protector de los suelos en el área. Tanto la topografía como la cobertura vegetal deben ser estudiadas con mayor profundidad con miras a la planificación conservacionista de los usos de la tierra en el área.

Palabras clave: Microcuenca; riesgo de erosión; erosión potencial; USLE; análisis espacial.

Abstract

The current, potential soil erosion and rainfall erosion risk was evaluated in the Aguas Calientes Watershed, combining parametric methods and spatial analysis by using GIS. The parametric model of Albaladejo (1988) allowed us evaluating the risk of erosion in a qualitative way in homogenous spatial units; Universal Soil Loss Equation (USLE) was used to estimate the current and potential erosion. 23 homogeneous units of erosion (UHE) were defined, and the erosion in each one of them was quantitative-qualitatively evaluated. The UHE indicate a high spatial variability of the erosive dynamics mainly influenced by the vegetal coverage. The current erosion demonstrates a predominance of the slight erosion rank due to the remarkable influence of factor C (USLE); however, sectors with high slope under cultivation showed an imminent risk of strong erosion. There is a potentially strong erosion due to the LS Factor, reason why the Vegetal Coverage Factor acquires great relevance as a protective agent of soils in the area. Topography and Vegetal Coverage must be deeply studied for sustainable land use planning in the area.

Key words: Watershed; soil erosion risk; potential of erosion; USLE; spatial analysis.

1 Universidad de Los Andes, Escuela de Geografía, Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: jmejia@ula.ve; dalpozzo@ula.ve

2 Universidad de Los Andes, Escuela de Geografía, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: publiomontilla@yahoo.es; alonsotorres1973@hotmail.com

1. Introducción

En Venezuela, las cuencas hidrográficas de montaña constituyen unidades territoriales de vital importancia, debido a las diversas actividades antropogénicas, de naturaleza económica y sociocultural que allí se desarrollan, además de la presencia de una importante cantidad de población. Por lo general, la población es muy laboriosa, arraigada a su tierra, con valores culturales, históricos y económicos propios que, al interactuar con el entorno geobiofísico, logran configurar un escenario con potencial geoeconómico importante en términos locales, e incluso regionales. Pero, a su vez, las cuencas altas de montaña tropicales presentan una serie de condiciones (altas pendientes, agresividad climática y suelos jóvenes) que le confieren una alta fragilidad ambiental (Richter *et al.*, 1985; Hernández, 1987; Hernández (1990); Barrios, 1994a; Mejía, 2000; Thapa, 2001). Ello condiciona, de hecho, la ocurrencia de diversos procesos de degradación ambiental, siendo la erosión uno de los más comunes y por ende, el foco de atención de diversas disciplinas científicas.

El impacto de la erosión se refleja en la baja productividad de los suelos, en la concentración de elementos químicos en el agua como: fungicidas, insecticidas y herbicidas derivados de la actividad agrícola y, por último, deviene en una disminución de la calidad paisajística, por lo que contribuye con el deterioro de las economías campesinas, disminuyendo así la calidad de vida de los pobladores del medio rural.

La microcuenca Aguas Calientes, localizada en el estado Mérida-Venezuela, es un claro ejemplo de lo antes señalado. Su cercanía al centro poblado de Tabay y al Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, capital homónima del estado, además de sus condiciones paisajísticas peculiares, le confieren condiciones para el asentamiento humano y para las actividades agrícolas. Sin embargo, lo accidentado del relieve y las condiciones geológicas, ecológicas, climáticas, etc., le otorgan un elevado potencial de degradación ambiental, particularmente de la ocurrencia de procesos como la erosión y el consecuente transporte de sedimentos; esto último puede, eventualmente, traducirse en una seria amenaza para los pobladores que viven aguas abajo, dado el carácter torrencial que naturalmente posee esta microcuenca.

Es por lo señalado que el objetivo central de este artículo es el de evaluar, de forma cualitativa y cuantitativa, la dinámica de los procesos erosivos, con el fin de establecer los niveles actuales y potenciales que los mismos muestran en el área.

2. Área de estudio

La microcuenca Aguas Calientes nace en el páramo El Escorial, al noreste de la cuenca del río Chama, del que es afluente por su margen derecha, y se encuentra localizada latitudinalmente entre las coordenadas: 08° 38' 8" y 08° 40' 29"N, y longitudinalmente entre 71° 04' 51" y 71° 03' 52"O; pertenece a la jurisdicción del

municipio Santos Marquina, estado Mérida, y ocupa una superficie aproximada de 234 ha (Figura 1).

La topografía, en una gran extensión, es escarpada y accidentada, presentando fuertes pendientes en las vertientes (en muchos casos > 40%), y un estrecho valle longitudinal cuyas pendientes oscilan entre 0 y 20 %, donde se asienta el centro poblado El Cucharito (Montilla y Torres, 2007).

Litológicamente, la microcuenca está dominada por rocas correspondientes a la Granodiorita del Carmen, caracteriza-

da por la alternancia de mica esquistos y gneises, gneises migmatíticos, anfibolitas, gneis graníticos y localmente mármoles y cuarcitas. También se encuentra la Adamelita de la Culata Norte, un tipo de roca conformada por biotita, moscovita, y pegmatitas de forma bandeada, así como también granos de feldespatos. Estas rocas han sido sometidas a grandes procesos de alteración a través de largos períodos de tiempo y, en consecuencia, se hallan con un grado de meteorización bastante pronunciado y, por ende, son inestables (MMH, 1997, citado por Mon-

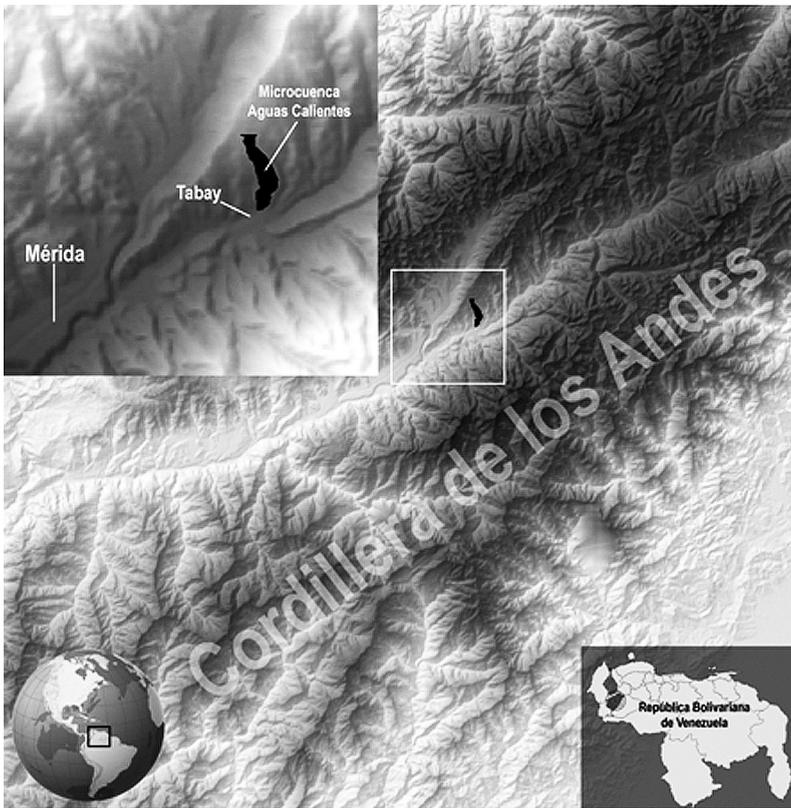


Figura 1. Localización del área de estudio en el contexto regional y nacional

tilla y Torres, 2007). En el fondo de valle se encuentran capas estratificadas de depósitos cuaternarios no consolidados ni estabilizados en forma de abanico aluvial morfológicamente irregular.

La presencia de la falla de Boconó, con orientación noreste-suroeste, supone una mayor inestabilidad de sus vertientes, generando la existencia de un material altamente susceptible a ser diaclasado, removido y transportado, por la acción de los agentes externos (Montilla y Torres, 2007).

El comportamiento climático está influenciado por factores geográficos, en particular por la orografía, pues al encontrarse inmersa entre dos bloques montañosos de gran altura (la Sierra Nevada y la Sierra de la culata), el área presenta una variabilidad climática local debido a las diferencias altitudinales, además de los efectos producidos por la circulación de masas de aire procedentes de la zona sur del lago de Maracaibo, hecho que determina un régimen bimodal en la precipitación. La precipitación media anual supera los 1.500 mm, con un período de lluvias que va de abril a noviembre, y una estación seca de diciembre a marzo. La temperatura, por su parte, presenta una media anual de 17,5 °C, con una amplitud térmica anual menor a los 2 °C (Maldonado, 2003).

Según Castillo (1965), los suelos en el área se han desarrollado a partir de materiales muy similares en cuanto a su edad, petrología y dinámica de depositación, además de las condiciones altitudinales. En el fondo de valle se encuentran suelos del tipo Troporthent Típico, con

alta influencia de la actividad fluvial, por lo que son suelos de matriz arenosa. En las zonas de vertientes predominan suelos de los tipos Humitropept Lítico, Humitropept Oxico, Humitropept Típico, Tropudult Oxico y Tropopsament Típico, de composición granulométrica más diversa.

El uso de la tierra que presenta la microcuenca es principalmente forestal en su parte alta, agrícola y de tierras de pastizales, en la parte media y baja; la vegetación nativa ha sido intervenida y la frontera agrícola ha ido progresivamente en aumento. En las orillas de los cauces y en general en toda la cuenca se observan vestigios de vegetación arbórea, arbustiva y herbácea.

3. Metodos

Este trabajo partió de la premisa básica de que los procesos de erosión hídrica, y particularmente la dinámica que los origina, son el resultado de la interacción de ciertas asociaciones de propiedades que conforman el sistema, en este caso, la microcuenca Aguas Calientes. Hochschild *et al.* (2003) conciben la cuenca de drenaje como un ensamblaje de procesos espaciales reflejados en la coexistencia de entidades espaciales que presentan diferentes niveles potenciales de erosión, que dependen de la interacción entre el capital natural (condiciones geobiofísicas) y la acción antropogénica.

En primer término, se recopiló información bibliográfica, hidro-climatológica, cartográfica y de sensores remotos,

sobre el área objeto de estudio. Para la elaboración de la cartografía de base se utilizó el mapa topográfico a escala 1:25.000 de Tabay (5941-I-NE), de la Dirección de Cartografía Nacional (1975). La información aerofotográfica empleada corresponde a la misión 010486 del año 1996, a escala 1:5.000. Es importante aclarar que debido a la carencia de información cartográfica básica sobre el sector superior extremo de la microcuenca, fue preciso restringir el análisis al área comprendida entre la coordenada 958.700, y el punto más bajo, en la confluencia de la quebrada Aguas Calientes con el río Chama.

Se realizó un análisis interpretativo de las fotografías aéreas, con el fin de identificar los diferentes usos de la tierra, así como las diferentes formaciones vegetales existentes, tomando como base la clasificación de usos de la tierra propuesta por la Unión Geográfica Internacional (UGI), (Calderón, 1980). Este análisis fue debidamente validado a través de varios recorridos de campo.

3.1 Elaboración de las coberturas temáticas

Las coberturas temáticas fueron procesadas y elaboradas a través del software Arc View 3.2. El mapa topográfico fue obtenido mediante la digitalización del área de estudio utilizando la hoja 5941-I-NE, a escala 1:25.000, la cual fue previamente rasterizada y, posteriormente, georeferenciada utilizando el software Arc-Gis 9.0.

El mapa de vegetación y uso de la tierra se obtuvo directamente de la interpretación aerofotográfica, a través del proceso de restitución fotogramétrica.

El mapa de pendientes por su parte, se realizó a partir del uso del modelo vectorial de elevación digital (TIN) del software Arc/View 3.2, obtenido a partir del mapa topográfico a escala 1:25.000. El cuadro 1 muestra los rangos de pendientes definidos para el área.

Cuadro 1. Rangos de pendiente

Tipo de Pendiente	Rango %	Clase
I	< 20	Suave a Moderada
II	20 – 40	Pronunciada
III	40 – 60	Fuerte
IV	> 60	Muy Fuerte

Fuente: Montilla y Torres, 2007

3.2 Evaluación cualitativa de la erosión

La evaluación cualitativa de la erosión se realizó utilizando el modelo paramétrico de Albaladejo (Albaladejo & Martínez, 1988; Albaladejo & Stocking, 1989), el cual se basa en la delimitación de 'unidades fisiográficas homogéneas' en las que los factores considerados condicionantes de procesos erosivos muestran homogeneidad. De este modo, el método evalúa las variables que influyen en el tipo y grado de erosión (Figura 2), bajo el supuesto de que se combinan para generar unidades espaciales en las que las características biofísicas, particularmente aquellas que condicionan la ocurrencia de erosión y la intensidad de la misma, tienen un

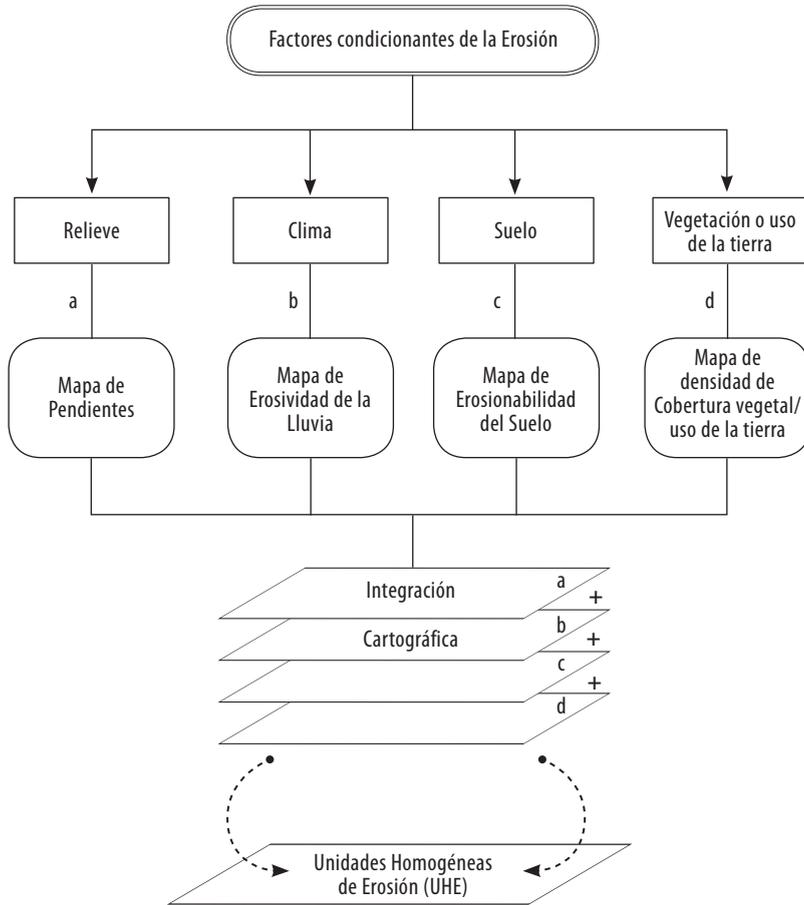


Figura 2. Esquema de la metodología propuesta para obtener el mapa de Unidades Homogéneas de Erosión (Albaladejo, 1988)

comportamiento espacialmente homogéneo.

Este proceso de evaluación permite la organización de los factores relevantes en la dinámica de la erosión hídrica a través de un esquema coherente de igualdad, que permite finalmente visualizar y caracterizar la dinámica paisajística, con relación a los procesos de erosión del suelo (Rafaelli, 2003).

Las unidades se clasifican en forma jerarquizada a través de un sistema multicategorico conformado por cuatro categorías: (1) Orden; (2) Suborden; (3) Gran Grupo, y (4) Subgrupo. Las dos primeras (orden y suborden) denotan en forma cualitativa la expresión de los factores de la erosión más importantes que, en términos espaciales, tienen una relevancia en el área de estudio.

Para efectos de este trabajo, se consideró relevante efectuar la evaluación definiendo las dos primeras categorías, hecho fundamentado en lo siguiente: en primer lugar, a juicio de Rafaelli (2003), son suficientemente adecuadas para la planificación a nivel regional y local. En segundo término, la carencia de información con alto nivel de detalle y rigurosidad dificulta el establecimiento de las otras categorías. Además, en este caso se determinó previamente que la variable precipitación (erosividad de la lluvia), presenta una cierta homogeneidad espacial, de modo que no explica la intensidad de erosión en función de la escala espacio-temporal utilizada.

Para definir las que en el presente trabajo se denominaron '*Unidades Homogéneas de Erosión*' (UHE), para las categorías de orden y suborden, se utilizaron las coberturas pendiente (P) y cobertura vegetal (V) para la categoría de orden, mientras que la variable uso de la tierra permitió definir la categoría de suborden. Se realizó previamente un cruce de las variables consideradas, a fin de definir los tipos posibles de UHE, con base en la nomenclatura establecida por Albaladejo (1988). A modo de ejemplo tenemos:

P₂ + C = P₂C: UHE con pendiente pronunciada y cultivos agrícolas

P₄ + V₂ = P₄V₂: UHE con pendientes muy fuertes y cobertura vegetal de baja densidad. Si agregamos el tipo de cobertura vegetal, tenemos el suborden:

P₄V₂₆: UHE con pendientes fuertes y cobertura de baja densidad (Pastos). El cuadro 2 contiene las tipologías de unidades homogéneas posibles para el área de estudio.

Posteriormente, el proceso de superposición digital de las coberturas antes mencionadas a través del Software Arc View 3,2, permitió finalmente definir espacialmente las Unidades Homogéneas de Erosión (UHE).

3.3 Evaluación cuantitativa de la erosión

La evaluación cuantitativa requirió de la estimación de los factores que condicionan la erosión, definidos en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

Para el cálculo del factor LS se aplicaron las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1978), las cuales se corresponden con el método de la RUSLE (Barrios, 1999):

El subfactor L se obtuvo a partir de la fórmula:

$$L = \left(\frac{m}{\lambda / 22,1} \right)$$

Donde:

L: es el subfactor longitud de la pendiente.

λ : es la longitud uniforme del terreno (metros).

m = 0,5 para cuencas forestales con pendientes por encima de 10% (Barrios, 1999)

Cuadro 2. Ordenes establecidos para la microcuenca Aguas Calientes (Unidades Homogéneas de Erosión)

Pendiente	Clase	Densidad de cobertura vegetal (%)	Tipo de uso	Orden	Suborden
< 20 20 – 40 40 – 60 > 60	Suave-mod. Pronunciada Fuerte Muy fuerte	0 – 10	2 ^a Horticultura	P1C P2C P3C P4C	P1C2a P2C2a P3C2a P4C2a
< 20 20 – 40 40 – 60 > 60	Suave-mod. Pronunciada Fuerte Muy fuerte	0 – 10	9b Suelo descubierto	P1V1 P2V1 P3V1 P4V1	P1V19b P2V19b P3V19b P4V19b
< 20 20 – 40 40 – 60 > 60	Suave-mod. Pronunciada Fuerte Muy fuerte	20	6 Pastos	P1V2 P2V2 P3V2 P4V2	P1V26 P2V26 P3V26 P4V26
< 20 20 – 40 40 – 60 > 60	Suave-mod. Pronunciada Fuerte Muy fuerte	90	3b Cultivos permanentes	P1V4 P2V4 P3V4 P4V4	P1V43b P2V43b P3V43b P4V43b
< 20 20 – 40 40 – 60 > 60	Suave-mod. Pronunciada Fuerte Muy fuerte	100	7 ^a Bosque denso	P1V4 P2V4 P3V4 P4V4	P1V47a P2V47a P3V47a P4V47a
< 20 20 – 40 40 – 60 > 60	Suave-mod. Pronunciada Fuerte Muy fuerte	90	7b Bosque ralo	P1V4 P2V4 P3V4 P4V4	P1V47b P2V47b P3V47b P4V47b

El subfactor S, (inclinación de la pendiente) se calculó a partir de la fórmula:

$$S = 16,8 \times \text{Sen } \theta - 0,5 \text{ si la pendiente} > 9\%$$

Donde:

S: es el subfactor inclinación de la pendiente.

$\theta = \arctg (p \% / 100)$.

El factor Erosividad de la lluvia (R) se obtuvo a partir de la información plu-

viométrica de la Estación Tabay, correspondiente al período 1971-2000, y de los resultados obtenidos por Andrades y Hernández (2004), quienes evaluaron las precipitaciones máximas y la ocurrencia de tormentas significativas en la cuenca alta del río Chama (Cuadro 3).

El factor de Erosionabilidad del Suelo (K) se obtuvo a partir de los valores tabulados según Kirkby y Morgan (1980, citados por Barrios, 1994b); la información requerida en este caso (clase textural y contenido de materia orgánica) fue obte-

nida a partir de los resultados de Castillo (1965). El cuadro 4 muestra los valores de K obtenidos para la microcuenca Aguas Calientes.

El factor Cobertura de la Tierra (C) se evaluó a partir de la metodología de Dissmeyer y Foster (1981), para lo cual fue preciso reinterpretar el mapa de uso de la tierra, a fin de determinar el porcentaje de cobertura de dosel, la altura del mismo y el porcentaje de suelo desnudo; con estos valores se estimó el valor C en la microcuenca Aguas Calientes (Cuadro 5).

Posteriormente, se procedió a la determinación de la erosión actual y potencial en la microcuenca, a través de la

multiplicación de los factores por medio del Software Arc/View 3.2. Para ello se aplicaron las siguientes formulas:

$$(1) \text{ Riesgo de Erosión Potencial} = R * K * LS$$

Donde:

R = es el factor erosividad de la lluvia en $Mj m ha^{-1} h^{-1} año^{-1}$

K = es el factor erosionabilidad del suelo en $t ha h ha^{-1} Mj^{-1} mm^{-1}$

LS = es el factor topográfico (adimensional)

$$(2) \text{ Riesgo de Erosión Actual} = R * K * LS * C$$

Cuadro 3. Distribución estadística L-Pearson para la estación climatológica de Tabay de 2 años de retorno y 24 horas de duración (P2,24)

Estación	Serial	N° de Datos	P.R. Años	Duración	Distribución Estadística	Resultado
Tabay	3038	20	2	24 horas	L- Pearson	61,6

Fuente: Andrades y Hernández, 2004

Cuadro 4. Determinación del factor K en la microcuenca Aguas Calientes utilizando los valores tabulados según Kirkby y Morgan (1980)

Asociación	Profundidad horizonte superficial (cm)	Clase Textural	Materia Orgánica (%)	K ($t ha h ha^{-1} Mj^{-1} mm^{-1}$)
A-11	0 – 15	Franco arenoso	16,7 %	0,025
A-61	0 – 10	Franco arenoso	14,72 %	0,025
	0 – 20	Franco Arenoarcilloso	4,62 %	0,028
A-50	0 – 15	Franco arenoso	17,85 %	0,025
B-50	0-15	Franco Arenoarcilloso	10,34 %	0,028
	0-20	Franco arenoso	10,34 %	0,025

Fuente: Montilla y Torres, 2007

Cuadro 5. Valores de C para la microcuenca Aguas Calientes. (Tierras forestales)

Uso del suelo	Tipo	% suelo desnudo	% Raíces Finas	(m) Altura del Dosel	% cobertura del Dosel	Alto contenido orgánico	C1	C2	Factor C
Cultivos perennes	3b	3%	10%	2	90%	0,70	0,0111	0,55	0,004
Tierra de Pastizales	6	30%	50%	1	20%	0,70	0,036	0,86	0,021
Bosque Alto	7a	3%	90%	16	100%	0,70	0,0030	0,96	0,002
Bosque Bajo	7b	10%	80%	8	90%	0,70	0,006	0,93	0,003

Fuente: Montilla y Torres, 2007

Donde:

R = es el factor erosividad de la lluvia en $Mj\ m\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$

K = es el factor erosionabilidad del suelo en $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ Mj^{-1}\ mm^{-1}$

LS = es el factor topográfico (adimensional)

C = es el factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional)

Calculada la erosión actual y potencial, se realizó una reclasificación de las unidades en el SIG (Arc View 3.2), para obtener los mapas de erosión actual y potencial de acuerdo con los rangos establecidos por la FAO (1993) para la USLE; dichos rangos se representan en los cuadros 6 y 7.

Cuadro 6. Clasificación de la erosión actual (USLE)

Clasificación de la erosión actual	Rango de erosión ($t.ha^{-1}.año^{-1}$)
Ligera	< 20
Moderada	20 – 100
Fuerte	100 – 300
Severa	> 300

Fuente: FAO, 1993

Cuadro 7. Clasificación de la erosión potencial (USLE)

Clasificación de la erosión potencial	Rango de erosión ($t.ha^{-1}.año^{-1}$)
Ligera	< 100
Moderada	100 – 500
Fuerte	500 – 1500
Severa	> 1500

Fuente: FAO, 1993

4. Resultados y discusion

4.1 Evaluación cualitativa de la erosión

A través del análisis espacial fueron definidas un total de 23 tipos de UHE en la microcuenca Aguas Calientes (Figura 3). A su vez, el cuadro 8 contiene la extensión de superficie de cada una de las UHE.

Puede claramente apreciarse en la figura 3, el alto nivel de fragmentación del paisaje visible en la parte media de la microcuenca, donde predominan las laderas fuertemente inclinadas. Dicho nivel

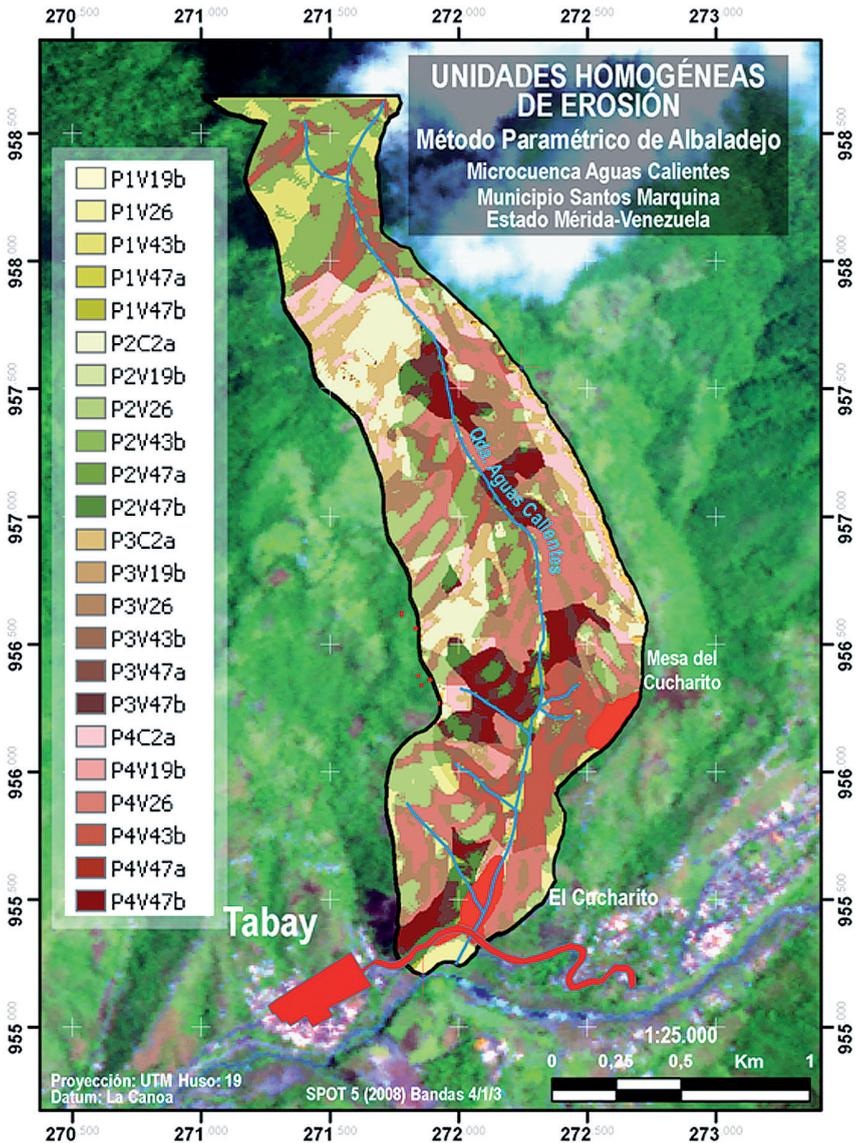


Figura 3. Unidades Homogéneas de Erosión (UHE) definidas en la microcuenca Aguas Calientes

de fragmentación también se evidencia en el cuadro 8, pues en el mejor de los casos, las UHE con mayor superficie representan tan solo un poco más del 10% de la superficie total. Ello simplemente

define una dinámica compleja de las interrelaciones geobiofísicas que determinan la ocurrencia de procesos de erosión hídrica que muestran en el área diferentes grados de magnitud.

Cuadro 8. Superficie de las unidades homogéneas de erosión en la microcuenca Aguas Calientes

Unidades Homogéneas de Erosión (UHE)	Superficie	
	(ha)	(%)
P1V19b	0,16	0,07
P1V26	4,74	2,03
P1V43b	9,49	4,06
P1V47a	0,10	0,04
P1V47b	1,08	0,46
P2C2a	19,66	8,40
P2V19b	0,50	0,21
P2V26	17,52	7,49
P2V43b	25,74	11,00
P2V47a	0,02	0,009
P2V47b	6,98	2,98
P3C2a	18,62	7,96
P3V19b	1,56	0,67
P3V26	25,54	10,91
P3V43b	18,80	8,03
P3V47a	0,03	0,01
P3V47b	10,02	4,28
P4C2a	11,37	4,86
P4V19b	1,37	0,59
P4V26	24,09	10,30
P4V43b	16,32	6,97
P4V47a	0,16	0,07
P4V47b	13,97	5,97
Centro Poblado	6,15	2,63
Total	234,0	100

La UHE que ocupa mayor superficie en el área es la P2V43b (25,74 ha), esto es, un 11,00% de la superficie total. En esta unidad, las pendientes se ubican en el rango 40-60%, con la presencia de cultivos permanentes (Café bajo sombra) con una alta densidad y alto porcentaje de cobertura del suelo. La segunda UHE en términos de extensión superficial es la P3V26 (25,54 ha), que ocupa el 10,91% del total de superficie. Esta unidad posee

fuertes pendientes (40-60%) y presencia de pastizales. La UHE P4V26 ocupa el tercer lugar, con una superficie de 24,09 ha. (10,30%); presenta pendientes muy fuertes (>60%); también bajo pastizal. En cuarto lugar aparece la UHE P2C2a. Se encuentra en pendientes de 20-40%, sometidas a un uso agrícola intensivo. Específicamente se practica la horticultura de piso alto; ocupa una superficie de 19,66 ha, lo cual representa un 8,40% del total de superficie.

En términos de la dinámica erosiva pueden diferenciarse 3 grupos de UHE en la microcuenca Aguas Calientes:

4.1.1 UHE con intensa dinámica de erosión. Este grupo incluye las unidades que en la actualidad se encuentran bajo uso agrícola: P2C2a, P3C2a, P4C2a y aquellas en las que el suelo descubierto muestra signos de intensa erosión: P2V19b, P3V19b y P4V19b (Figura 3). Las pendientes en estas UHE van de pronunciadas a muy fuertes (Cuadro 1). El tipo de actividad agrícola que se realiza (horticultura de piso alto), y la ausencia notoria de prácticas agrícolas, así como de asistencia técnica son condicionantes antropogénicos de la dinámica erosiva en entidades ecológicamente susceptibles a la degradación de los suelos. De acuerdo con los resultados de Quiñones y López (1997), el área de estudio se encuentra dentro del polígono de alto riesgo de degradación de los suelos, derivado de la topografía, la alta erosionabilidad de los suelos y la agresividad climática. En este caso, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal constituyen factores críticos

que condicionan la erosión en el área, hecho que coincide con los resultados obtenidos por Albaladejo (1988) y por Rafaelli (2003). Dicha dinámica en tales UHE fueron corroboradas en campo, observándose contundentes evidencias de erosión: deslizamientos, pedestales e incisiones de la red de drenaje en el terreno (Figura 4).

4.1.2 UHE con moderada dinámica de erosión. Se incluyen aquí las unidades: P2V26, P3V26 y P4V26, las cuales presentan rangos de pendientes de pronunciada a muy fuerte (Cuadro 1), y se encuentran actualmente bajo pastizales (Figura 3). También se ubica en este grupo la UHE: P1V19b. Los pastos le otorgan una mayor protección al suelo que los

cultivos hortícolas, por lo que en estas unidades el desplazamiento de partículas del suelo va a depender del nivel de desarrollo del pasto; en este sentido, los pastizales suelen ser susceptibles a procesos naturales (sequías, contenido de nutrientes en los suelos), o bien a procesos antropogénicos (quemadas, sobrepastoreo, fertilización, etc.). En general, los pastizales existentes en la microcuenca no presentan un desarrollo óptimo, por lo que se supone que la intensidad de los procesos erosivos es moderada en estas unidades (Figura 5).

4.1.3 UHE con baja dinámica de la erosión hídrica y alta estabilidad. Se incluyen aquí las unidades: P1V47a, P1V47b, P2V47a, P3V47a, P3V47b, P4V47a,



Figura 4. UHE P3C2a. Ubicada en la parte alta de la microcuenca. Destaca la presencia de incisiones profundas, evidencia fiel de la intensa dinámica de la erosión hídrica, que puede ocurrir en esta categoría de UHE



Figura 5. UHE P4V26. Ubicada en pequeñas áreas dispersas en la parte media. Se observa la condición irregular del pasto en cuanto a grado de cobertura, lo cual incide directamente sobre el grado de protección del suelo en este tipo de UHE

P4V47b (las cuales se encuentran bajo bosque alto denso y bosque ralo denso); P1V43b, P2V43b, P3V43b, P4V43b (bajo cultivos permanentes), además de la UHE P1V26 (bajo pastizal), (Figura 3). Aquí las pendientes van de suaves-moderadas a muy fuertes (Cuadro 1); no obstante, en estas unidades la dinámica de la erosión hídrica es muy baja o incluso nula (Figura 6), debido a la densa cobertura vegetal (sobre todo cobertura foliar), que garantiza una efectiva protección al suelo, a la vez que regula la actividad hidrológica en las cuencas de drenaje (López, 2002). Las fuertes pendientes de la microcuenca suponen un alto valor agregado e importancia de estas categorías de cobertura vegetal, de lo cual dependerá su estabilidad edáfica frente a la degradación.

4.2 Evaluación cuantitativa de la erosión

La figura 7 muestra la distribución espacial del riesgo de erosión actual en la microcuenca, mientras que los valores de superficie para cada rango se muestran en el cuadro 9.

De acuerdo con las condiciones actuales, en la microcuenca Aguas Calientes predomina la erosión ligera en un 55% de su superficie, con una pérdida anual inferior a $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Estos ligeros valores se observan en las UHE bajo cobertura de bosque alto, bosque bajo, pastizales y cultivos permanentes (Grupo III).

Un 22,5% de la microcuenca muestra una erosión severa, correspondiendo en este caso a las UHE que se encuen-



Figura 6. UHE P4V47a. Se observa la densidad de la cobertura foliar, que supone un alto grado de efectividad en la protección del suelo frente a la acción erosiva de la lluvia

Cuadro 9. Distribución espacial del riesgo de erosión actual en la microcuenca Aguas Calientes

Tipo de Erosión (t.ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Superficie	
	ha	%
Ligera (< 20)	128,073	54,8
Moderada (20 – 100)	51,701	22,1
Fuerte (100 -300)	1,863	0,8
Severa (> 300)	52,285	22,3
Total	234	100

tran bajo uso agrícola (P2C2a, P3C2a y P4C2a), actividad ésta que se desarrolla en el área sin ningún tipo de prácticas conservacionistas, y en muchos casos, sin la debida asistencia técnica por parte de los organismos competentes, lo cual su-

pone que la pérdida de suelo supera las 300 ton/Ha/año. La erosión moderada por su parte, afecta el 22% de superficie de la microcuenca, con pérdidas de suelo que van de 20 a 100 ton/ha/año; básicamente está confinada a las UHE que poseen una cobertura vegetal de menor efectividad, como pastizales y, en algunos casos, bosque bajo (P4V26 y P4V47b).

Por último, sólo un 0,8% de la microcuenca está afectada por procesos de erosión fuerte (100-300 t.ha⁻¹.año⁻¹); básicamente corresponde a las UHE P2V19b, P3V19b y P4V19b, referidas a afloramientos rocosos y tierras erosionadas, las cuales muestran un avanzado estado de degradación.

No obstante, el valor promedio de erosión actual estimado para toda la mi-

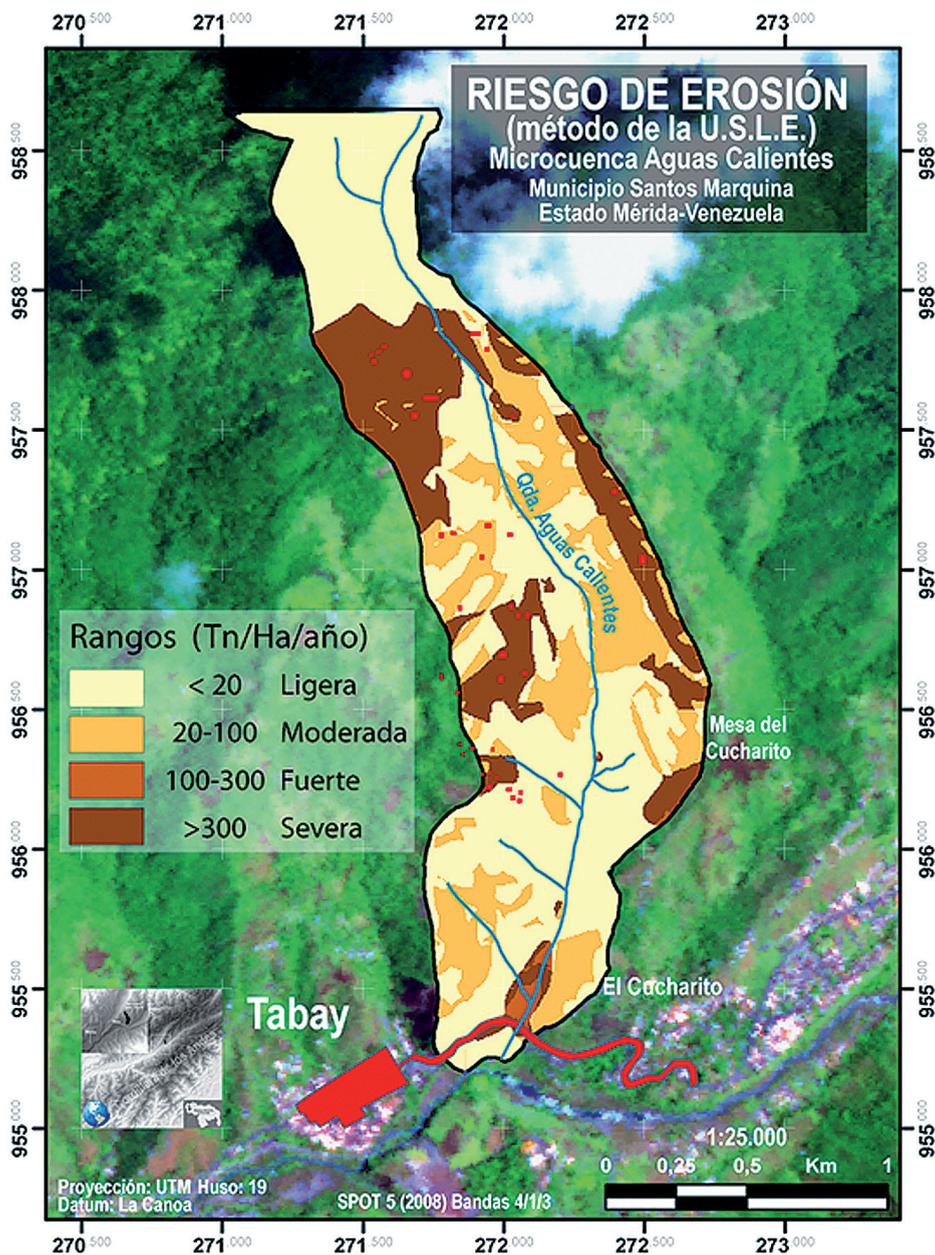


Figura 7. Riesgo de erosión actual en la microcuenca Aguas Calientes

crocuencia ($139 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) indica que la erosión es fuerte, y que su ocurrencia está supeditada a los cambios en la cobertura vegetal.

En cuanto al comportamiento de los factores en la microcuencia, destaca el hecho de que los valores de R resultaron bajos, mientras que los valores correspondientes al factor K resultaron moderados. Esto concuerda con los resultados de Raffaelli (2003), quien afirma que la variable precipitación, y por consiguiente el factor R, no explican la intensidad de los procesos erosivos en escalas temporales y espaciales pequeñas. En consecuencia, son los factores topográfico (LS) y cobertura vegetal (C) los que contribuyen a explicar la dinámica erosiva en la microcuencia.

Se observó una alta correspondencia entre el modelo de UHE y los resultados arrojados por el modelo cuantitativo USLE, lo cual indica que el modelo cualitativo permite predecir con adecuada precisión la dinámica de la erosión hídrica en una cuenca montañosa, e identificar las áreas sujetas a intensa erosión. Raffaelli (2003), logró niveles de precisión superiores al 70% al aplicar este método en una cuenca montañosa de Argentina, sobre todo en la determinación de áreas de erosión intensa.

La figura 8 muestra la distribución espacial del riesgo de erosión potencial en la microcuencia, mientras que el cuadro 10 muestra la correspondiente distribución espacial de los valores de pérdida de suelo.

Se observa claramente la alta susceptibilidad que la microcuencia presenta ante los procesos de degradación del sue-

lo. La erosión fuerte ($500\text{-}1.500 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) podría alcanzar el 89% de la superficie total, debido al factor Topográfico. La erosión moderada apenas cubriría un 8% de la superficie, mientras que la erosión severa sólo alcanza el 3% de la superficie total.

Esta situación tendría graves implicaciones no solo en lo que concierne a la degradación per se del recurso suelo, sino que además la elevada producción de sedimentos aumentaría el riesgo de crecidas torrenciales, y sus efectos colaterales, aguas abajo.

Cuadro 10. Distribución espacial de la erosión potencial en la microcuencia Aguas Calientes

Erosión ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)	Superficie	
	ha	%
Moderada (100 – 500)	19.2	8,2
Fuerte (500 – 1500)	208.1	88,9
Severa (>1500)	6.7	2,9
Total	234	100

5. Conclusiones

La microcuencia Aguas Calientes muestra una apreciable variabilidad espacial en cuanto a la dinámica de los procesos de erosión hídrica, la cual está condicionada por los cambios que allí han ocurrido y continúan ocurriendo en la cobertura vegetal y el uso del suelo.

La microcuencia posee una alta vulnerabilidad a los procesos erosivos, siendo el factor topográfico el más críti-

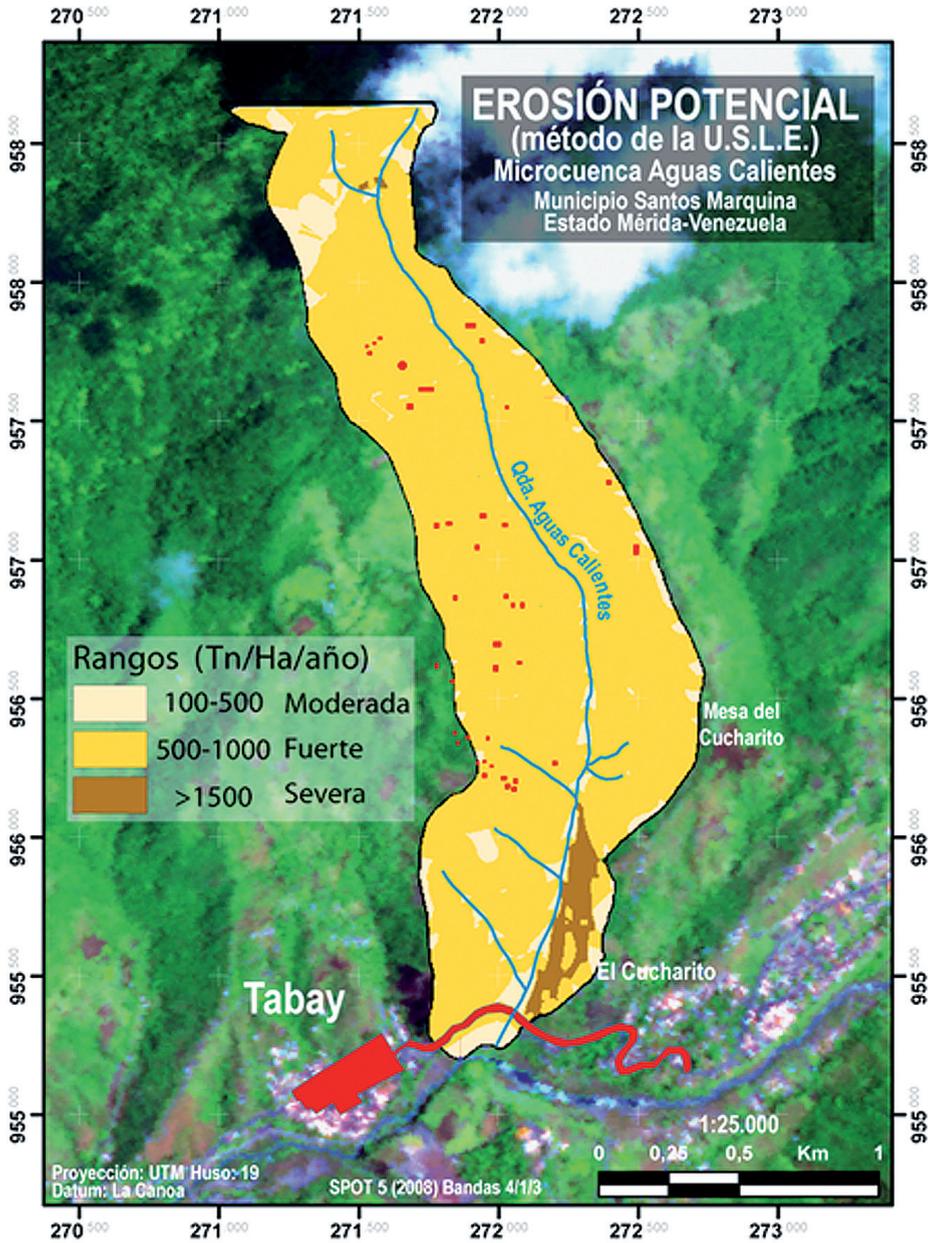


Figura 8. Erosión potencial en la microcuenca Aguas Calientes

co en cuanto a la dinamización de tales procesos, el cual, conjuntamente con la cobertura vegetal, contribuye a explicar en mayor medida la dinámica espacial de la erosión hídrica. Ello queda claramente demostrado por los resultados obtenidos en ambas evaluaciones, y muy particularmente, en los valores de erosión potencial estimados. Por otra parte, tanto el factor erosividad de la lluvia (R) como el factor erosionabilidad del suelo (K), acusaron una moderada a baja contribución a la explicación de la dinámica de la erosión hídrica de la microcuenca.

Los valores de erosión potencial obtenidos, indican una imperativa necesidad de conservar, y específicamente de preservar la cubierta vegetal natural en el área, como mecanismo de mantenimiento de la estabilidad de las vertientes frente a la dinámica de la erosión hídrica.

La evaluación cuali-cuantitativa de la erosión y, específicamente, la combinación de ambos métodos utilizados facilitó la representación de la dinámica erosiva en la microcuenca con un alto nivel de precisión, permitiendo visualizar y relacionar claramente los valores estimados de erosión con la espacialidad de su ocurrencia a través del paisaje. Ello es de gran utilidad para el estudio de la dinámica de la erosión hídrica en el contexto de la planificación local y regional de los usos del suelo con fines de conservación.

La coexistencia de un riesgo de erosión potencial fuerte, junto con el carácter torrencial de la microcuenca, se conjugan para otorgarle a la misma un alto riesgo de ocurrencia de eventos de extraordinaria magnitud, así como de otros

procesos de erosión hídrica como movimientos de masa, que pueden representar una amenaza para los pobladores del área, específicamente, para los ubicados en la parte baja de la microcuenca. Esto debe ser considerado por los organismos competentes, los que deben promover un proceso continuo de gestión ambiental que incorpore programas de asistencia técnica y prácticas de conservación en las partes media y alta de la microcuenca, y al mismo tiempo de preservación de las áreas boscosas, para garantizar la estabilidad de los suelos de las vertientes y la regularidad de los procesos hidrológicos. En este sentido, la propuesta de recuperación ambiental formulada por Finol (2002), debería ser objetivamente considerada en este caso.

6. Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la ULA (CD-CHT), por el apoyo financiero otorgado a esta investigación (Proyecto: FO-563-04-01-F).

7. Referencias citadas

- ALBALADEJO, J. & M. MARTÍNEZ. 1988. *Evaluation and mapping of erosion risks. An example for SE Spain. Soil Technology*. 1: 77-87.
- ALBALADEJO, J. & M. STOCKING. 1989. *Comparative evaluation of two models in prediction storm soil loss from erosion plots*

- in semi-arid Spain*. **CATENA**, 16(32): 141-164.
- ANDRADES, J. y K. HERNANDEZ. 2004. *Distribución espacial de precipitaciones máximas y análisis de tormentas significativas en la cuenca alta del río Chama*. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 85 p. (Inédito).
- BARRIOS, A. 1994a. Diagnóstico del enfoque de manejo de cuencas y del continuo deterioro de los recursos naturales en las cuencas altas de Venezuela. *Memorias del II Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas. Mérida-Venezuela* (6 al 11 de Noviembre).
- BARRIOS, A. 1994b. *Erosión y producción de sedimentos en cuencas hidrográficas*. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- BARRIOS, A. 1999. *Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con IDRISI. Aplicación en una microcuenca andina*. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- CALDERON, C. 1980. *El muestreo espacial y la fotointerpretación en el estudio del uso de la tierra*. Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela. Trabajo de ascenso. 90 p. (Inédito).
- CASTILLO, J. 1965. *Estudios de los suelos de las partes altas de las cuencas de los ríos Chama y Santo Domingo*. Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- DISSMEYER, G. E., & G. R. FOSTER. 1981. *Estimating the Cover-Management (C) in the Universal Soil Loss Equation for Forest Conditions*. **Journal of Soil and Water Conservation**. 36(4): 235-240.
- FINOL, N. 2002. *Propuesta de la recuperación de la microcuenca "Quebrada Aguas Calientes" municipio Santos Marquina Edo. Mérida, con planificación comunitaria y participativa*. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Informe de pasantías.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 1993. **Modelo para el pronóstico de la dinámica de erosión en los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra**. Roma-Italia. 96p.
- HERNANDEZ, E. 1987. *Manejo de cuencas (Fundamentos y aplicación)*. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- HERNANDEZ, E. 1990. *Manejo de cuencas hidrográficas*. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- HOCHSCHILD, V; MÁRKER, M; RODOLFI, G and H. STAUDENRAUSCH. 2003. *Delineation of erosion classes in semi-arid southern African grasslands using vegetation indices from optical remote sensing data*. **Hydrological Processes**. 17: 917-928.
- LÓPEZ, R. 2002. **Degradación del suelo**. CIDIAT-Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- MALDONADO, J. 2003 *Impacto de la expansión urbana de Tabay en el medio ambiente*. Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 109 p. (Inédito).
- MEJÍA, J. 2000. *Un modelo suelo-paisaje para la evaluación automatizada de tierras con fines conservacionistas en cuencas altas. Caso: microcuenca del río Zarzales*,

- Edo. Mérida*. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Tesis de Maestría, 173 p. (Inédito).
- MONTILLA, P y G. TORRES. 2007. *Evaluación de la erosión combinando métodos paramétricos y análisis espacial en la microcuenca Aguas Calientes del municipio Santos Marquina, Edo. Mérida*. Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 135 p. (Inédito).
- QUIÑONEZ, E. y R. LÓPEZ. 1997. *Riesgo de degradación de los suelos por la erosión hídrica en el estado Mérida, Venezuela*. **Revista Geográfica Venezolana**. Vol. 38 (2): 101-121.
- RAFAELLI, S. 2003. *Paisaje erosivo en cuencas de montaña. Modelación con extrapolación espacial ascendente*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral, 196 p. (Inédito).
- RICHTER, D.; SAPLACO, S. y P. NOWAK. 1985. *Problemas de la gestión de las cuencas en las tierras altas tropicales húmedas*. **La naturaleza y sus recursos**. 21(4): 10-21.
- THAPA, G. 2001. *Changing Approaches to mountain watersheds Management in Maitland Routh and southeast Asia*. **Environmental Management**. 27(5): 667-679.
- WISCHMEIER, W & D. SMITH. 1978. *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*. **USDA Agricultural Handbook** N° 537.