

Determinación de la erosión hídrica y la producción de sedimentos en la cuenca del río Pixcayá aplicando herramientas SIG

Manuel Fernando Luna Lemus

Egresado de la Maestría en Estudios Ambientales, Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala
fluna@aydconsultores.com

RESUMEN: La cuenca del río Pixcayá, es una de las cuencas que conforma el Proyecto Xayá-Pixcayá, abastece de agua a la ciudad de Guatemala (140,000m³ diarios). La alta carga de sedimentos en la cuenca del río Pixcayá, algunos días del año no permite utilizar el agua en la planta de potabilización Lo de Coy, siendo no apta para potabilizar y por consiguiente se descarta. La erosión es un problema ambiental que aqueja al país y tiene un impacto negativo en los agricultores pobres al perder la capa superficial de suelo y en el ambiente al afectar la calidad del agua, debido al incremento de partículas suspendidas y principalmente por las sustancias que se encuentran asociadas a dichas partículas, como nutrientes y plaguicidas. La investigación tiene como propósito determinar la erosión hídrica y la producción de sedimentos. La erosión se estimó con la ecuación universal de pérdida de suelo -USLE- y la producción de sedimentos con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada -MUSLE-. Los factores que integran la ecuación se determinaron con Arcgis 10.1. La erosión muy alta de la cuenca cubre el 3% del área y la erosión alta el 11%. La erosión media anual de la cuenca es de 119.56 Ton*Ha⁻¹año⁻¹. El volumen de suelo erosionado es de 0.8 millones de toneladas anuales y la producción de sedimentos es de 0.18 millones de toneladas por año. Los factores que determinan en mayor medida el potencial de erosión son: topografía (LS) y uso del suelo (C). La erosión actual en la cuenca es 10 veces mayor que el límite permisible de erosión. La microcuenca que produce la mayor carga de sedimentos es la microcuenca Balanyá Alto con una producción anual de 19.75 Ton*Ha⁻¹año⁻¹. La investigación plantea una ruta para la aplicación de la -USLE-, a nivel de cuencas hidrográficas usando Sistemas de Información Geográfica.

PALABRAS CLAVE: erosión, sedimentos, USLE, cuenca, Pixcayá, SIG.

Determination of water erosion and sediment production in the watershed of the river Pixcayá using GIS tools.

ABSTRACT: Pixcayá river basin is a watershed that forms the Xayá-Pixcayá Project supplies water to the city of Guatemala (140,000 m³ per day). The high sediment loads in the basin of the river Pixcayá, during some days of the year do not allow a proper water treatment at Lo de Coy plant and as a consequence the water is discarded as it is not suitable for drinking purposes. Erosion is an environmental problem that afflicts the country and has a negative impact on the poor farmers due to topsoil loss and the environment by affecting water quality due to increased suspended particles and mainly by the substances they are associated with said particles, as nutrients and pesticides. Erosion was estimated with the universal soil loss equation -USLE- and sediment production with the universal equation of soil loss -MUSLE- modified. The factors that make up the equation were determined with 10.1 Arcgis. The very high erosion basin covers 3%; the high erosion area, 11%. The average annual erosion of the basin is 119.56 Ton * Ha⁻¹ year⁻¹. The eroded soil volume is 0.8 million tons annually and sediment production is 0.18 million tons per year. The factors that determine further the potential for erosion are topography factor (LS) and land use (C). The current erosion in the basin is 10 times higher than the allowable limit erosion. The watershed that produces the greatest load of sediment is the watershed Balanyá Alto with an annual production of 19.75 Ton * Ha⁻¹ yr⁻¹. The research raises a path for the implementation of the -USLE-, watershed level using Geographic Information Systems.

KEYWORDS: erosion, sediments, USLE, watershed, Pixcayá.

Introducción

El suelo es un recurso natural importante para la vida del hombre, existiendo una estrecha relación de dependencia entre ambos; sirve de soporte para un número importante de actividades productivas en diferentes sectores como: emplazamientos industriales y el desarrollo habitacional; además tiene funciones productivas directas en actividades primarias como la agricultura, ganadería y silvicultura.

El uso inadecuado del recurso suelo conlleva a la degradación, provocada por diferentes causas. La principal forma de degradación del suelo es la erosión. De acuerdo con Suárez (1980), la erosión es un proceso de arrastre del suelo por acción del agua o del viento; o como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de partículas de suelo causados por el agua y el viento.

Estudios realizados en Guatemala confirman que los suelos del país especialmente en las zonas de ladera se encuentran en un proceso de franca degradación. IARNA-URL (2009), determinó que solamente en las áreas clasificadas con categoría de sobreutilización de acuerdo a la capacidad de uso de la tierra se pierden anualmente 149.5 millones de toneladas de suelo por año en el país.

Se determinó la erosión hídrica y la producción de sedimentos en la cuenca del río Pixcayá, que forma parte del proyecto Xayá-Pixcayá, el cual abastece de agua potable a los habitantes de la ciudad de Guatemala. Ambas cuencas aportan en promedio 140 mil metros cúbicos diarios, para abastecer la ciudad de Guatemala y representa un 39% del agua que suministra la Empresa Municipal de Agua -EMPAGUA- (Municipalidad de Guatemala, 2014). La cuenca del río Pixcayá inicia en el cerro Puculaj en el municipio de Santa Apolonia del departamento de Chimaltenango a una altura de 2,653 msnm; se localiza en los paralelos 461801 a 448718 de latitud norte y los meridianos 1635100 a 1614830 de longitud oeste. La cuenca de aportación se delimitó al punto de la presa el Tesoro localizada en la coordenada 1623351, 461813 a una altura de 1740 msnm (Figura 1). La superficie de la cuenca es de 156.059 km² y el perímetro de 64.366 kilómetros. Se encuentra localizada en la región del Altiplano Central, en el departamento de Chimaltenango y cubre parcialmente los municipios de Tecpán Guatemala, Santa Apolonia, Santa Cruz Balanyá, Patzicía, San Juan Comalapa, Zaragoza, San Andrés Itzapa y Chimaltenango (Cuadro 1). La población según INE (2003) para el Censo del año 2002 era de 43,555 habitantes. La población estimada para el año 2,014 es de 61,524 habitantes. En la cuenca se tienen identificados 78 centros poblados (INE, 2004). Está conformada por dos regiones fisiográficas Altiplano hidrovolcánico y Montaña volcano-erosional, se encuentran 5 órdenes de suelos, la profundidad media de las 71 unidades de suelo presentes en la cuenca es de 121.2 cm (MAGA, 2010), considerados como: suelos profundos. El río Pixcayá pertenece a la cuenca del río Motagua que drena al Mar Caribe.

La determinación de la erosión hídrica se realizó empleando la USLE aplicando herramientas SIG, que permitieron modelar

el comportamiento de la erosión a nivel de unidades espaciales mínimas (celdas de 90*90 metros) bajo diferentes escenarios de prácticas de uso y conservación de suelos. La producción de sedimentos se estimó utilizando la MUSLE.

Se estimó la erosión potencial y la producción de sedimentos de la cuenca bajo las condiciones actuales y considerando posibles escenarios de manejo (prácticas de conservación de suelos principalmente). Los escenarios de manejo mostraron que las prácticas de conservación de suelos tienen el mayor efecto en la reducción de la erosión y especialmente en disminuir la producción de sedimentos.

La pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Pixcayá tiene efectos económicos para los campesinos que dependen de la agricultura, al perder la capa de suelo en la que se concentran los nutrientes y la materia orgánica que incluye la biota. El arrastre de sedimentos conlleva la introducción de elementos que afecta la calidad del agua, como nutriente y plaguicidas los cuales a su vez pueden repercutir en la salud de las personas.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en etapas sucesivas en las cuales se profundizó en el conocimiento y la comprensión del fenómeno de la erosión hídrica y la producción de sedimentos, aplicando técnicas SIG para su análisis a nivel de cuenca hidrográfica.

Los sistemas de información geográfica, incluyendo los sensores remotos, constituyen un conjunto de herramientas que permiten realizar análisis espaciales de diferentes fenómenos que ocurren dentro de un espacio geográfico determinado.

En el proceso de la investigación se identificaron estudios realizados en diferentes regiones en donde se aplicaron herramientas SIG para la estimación de la erosión, se priorizó estudios recientes realizados en la región Latinoamericana. Se analizaron las técnicas los métodos y las fuentes de información empleadas, ya que especialistas en la materia manifiestan las dificultades que se tienen debido a la falta de información, lo cual no permite realizar modelaciones adecuadas.

Cuadro 1. Distribución de la cuenca del río Pixcayá por municipio

Municipio	Área dentro de la cuenca en km ²	% de la cuenca
Tecpán Guatemala	15.787	10.12
San Juan Comalapa	48.101	30.82
Chimaltenango	2.192	1.40
Zaragoza	35.150	22.52
Santa Cruz Balanyá	19.799	12.69
Patzicía	25.276	16.20
San Andrés Itzapa	9.755	6.25
Total	156.059	100.00

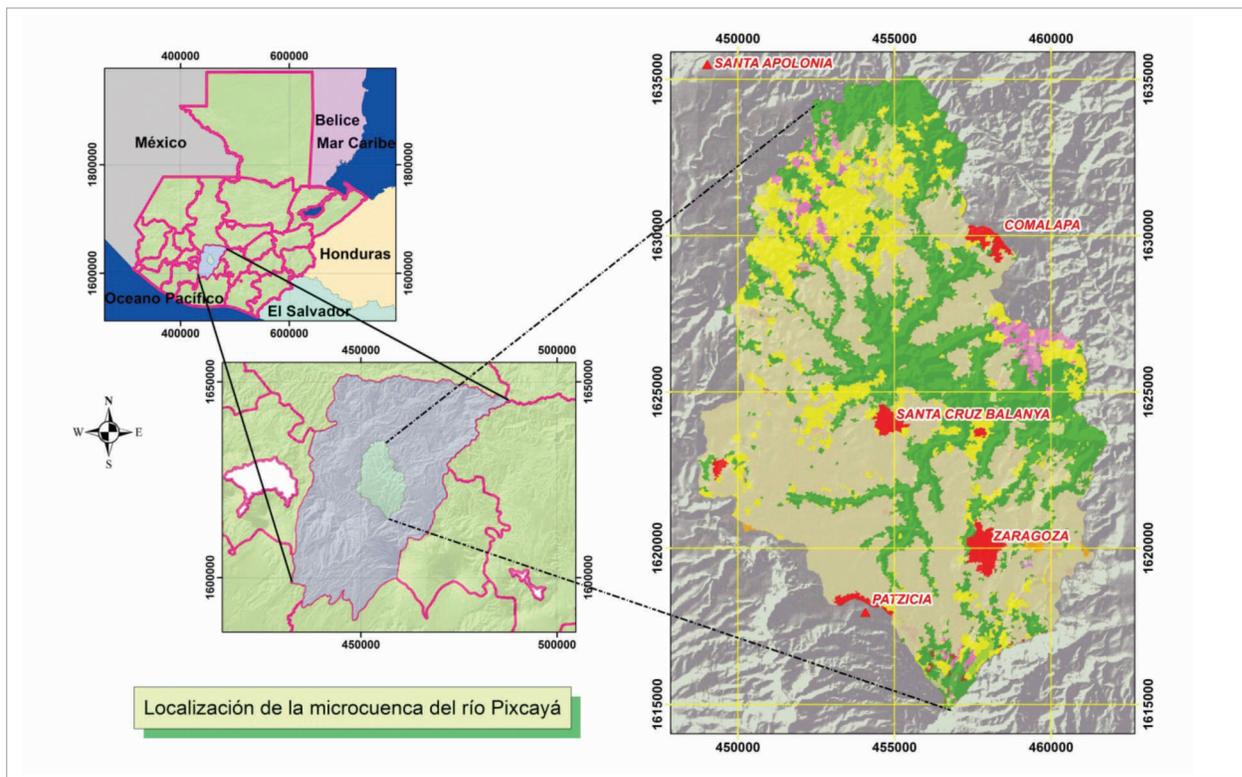


Figura 1. Localización de la cuenca del río Pixcayá

Para la estimación de la erosión se utilizó la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo -USLE- (Wischmeier & Smith, 1978), integrada por los siguientes factores: erosividad de la lluvia factor (L), erodabilidad del suelo factor (K), factor de longitud y gradiente de la pendiente (LS), cobertura del suelo factor (C) y prácticas de conservación de suelos factor (P). La ecuación queda expresada de la manera siguiente:

$$A = R K L S C P$$

Dónde:

- A = Pérdida de suelo por unidad de superficie y tiempo, expresado en ($T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).
- R = Es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$)
- K = Es el factor de erodabilidad del suelo [$(Mg \cdot ha^{-1}) \cdot (MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1})$]
- LS = Factor de longitud y pendiente del terreno (Adimensional)
- C = Factor de cobertura o cultivo (Adimensional)
- P = Prácticas de conservación del suelo (Adimensional)

Factor R

R es uno de los factores más importantes que determina el poder de la erosividad de la lluvia y expresa el promedio anual de la energía y la intensidad de la lluvia, para su cálculo se requiere análisis de intensidades de lluvia y contar con registros de información pluviométrica, en el caso de la presente investigación solamente se cuenta con información pluviométrica de la estación Balanyá. El factor R se estimó por medio de la combinación de dos métodos: El índice modificado de Fournier propuesto por Arnoldus, Boodt, and Gabriels (1980) y la ecuación basada en Fournier establecida por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992), para zonas tropicales.

Para la estimación del factor R se usaron los mapas raster de lluvia mensual de la república de Guatemala facilitados por el Instituto de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-, (INSIVUMEH, 2014).

Factor K

El factor K es el factor de la erodabilidad del suelo que representa la susceptibilidad del suelo a la erosión. Para la estimación de este factor se utilizará la función propuesta por Williams (1990), ya que para todo el departamento de Chimaltenango se cuenta con estudio de los suelos (MAGA, 2010).

Factor LS

El cálculo del factor de la longitud y gradiente de la pendiente ha sido uno de los factores más complicados de estimar para áreas a nivel de cuenca, ya que la USLE, fue desarrollada a nivel de parcelas. Con la ayuda de los SIG y los modelos digitales de terreno -DEM-, se han determinado métodos para estimar con facilidad dichos factores. Se utilizó el DEM de país el cual tiene una resolución 20 metros por pixel (MAGA, 2007). Para la estimación de este parametro se siguió la metodología propuesta por Desmet & Govers (1996) citado por Velásquez (2008), empleando las ecuaciones siguientes:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{(1+F)} \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$
$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22.13)^m}$$

Donde:

- $A_{(i,j)}$ [m] es el área aportadora unitaria de un pixel (celda).
- D es el tamaño del pixel
- X es el factor de corrección

El factor S: El ángulo β se toma cómo el ángulo medio a todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente.

Factor C

El factor C representa los efectos de las plantas, la cobertura, la biomasa y las actividades perturbadoras del suelo en los procesos de erosión. Para la utilización de los valores de C se utilizó la información generada por Lianes, Marchamalo & Soriano (2009), quienes hacen una investigación en una cuenca con condiciones similares al río Pixcayá en Costa Rica y además recopilaron información de diferentes autores para diferentes usos de la tierra (Cuadro 2).

Factor P

El factor P representa el impacto que las prácticas de conservación de suelos tienen sobre la erosión. Este valor se estimó con base a los valores propuestos por Wischmeier & Smith (1978) (Cuadro 3).

El modelo de predicción de sedimentos basado en la ecuación universal de pérdida de suelo cambia el factor R por el producto de Q^*q_p . Esta ecuación puede ser utilizada para estimar la producción de sedimentos diaria, mensual y anual, Williams and Berndt (1976), citado por Williams (1977). La ecuación es expresada como:

$$Y = 11.8(Q^*q_p)^{0.56} K L S C P$$

Dónde:

- Y = Sedimentos aportados a una sección del cauce para una tormenta determinada sobre la cuenca (t/ha).
- Q = Escorrentamiento medio (m^3)
- q_p = Escorrentamiento máximo (m^3/s)
- K = Erosibilidad del suelo [$(Mg^*ha^{-1}) * (MJ^*mm^*ha^{-1}^*h^{-1})$]
- L = Longitud de la pendiente (adimensional)
- S = Grado de la pendiente (adimensional)
- C = Cobertura vegetal (adimensional)
- P = Prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional).

Para la estimación de caudales se delimitaron 18 microcuencas y se aplicó el método de la curva número -CN- (Mockus, 1969). El método de la CN es el más usado para la estimación de caudales en general y particularmente aplicando la MUSLE. La curva número se obtuvo como resultado de la interacción del mapa de propiedades hidrológicas de cada unidad de suelos (derivado del mapa de suelos de Chimaltenango) y el mapa de cobertura y uso de la tierra (MAGA, 2006). Una vez definida la curva número se determinó el volumen de agua escurrida y el caudal pico.

Se modeló la erosión hídrica usando SIG, aplicando la herramienta de álgebra de mapas del Software Arcgis (ESRI, 2012). La modelación consistió en primera instancia en generar en formato *raster* cada uno de los factores que emplea la USLE. Posteriormente utilizando la misma herramienta, se procedió a aplicar la ecuación (USLE), finalmente se obtuvo un mapa en formato raster con los valores de erosión a nivel de celdas. El mapa resultante se clasificó para una mejor interpretación de los resultados de acuerdo a los criterios convencionales de clasificación de los niveles de erosión.

En esta etapa se identificaron los sitios en los cuales se tiene los valores de erosión más alto y se determinó el conjunto de factores físicos que determinan dichas consecuencias.

Resultados

Factor R

Los valores de erosividad de la cuenca del río Pixcayá presentan un comportamiento uniforme con un valor medio ponderado para toda la cuenca de $6,432 MJ^*mm^*ha^{-1}^*h^{-1}^*año^{-1}$ y el rango se encuentra desde $5,578 MJ^*mm^*ha^{-1}^*h^{-1}^*año^{-1}$ en la parte baja y central de la cuenca en los alrededores del casco urbano

Cuadro 2. Factor de vegetación (Factor C)

Uso del suelo	Factor C Mora 1987	FAO 1989	ICE 1999	Saborio 2002 Gómez 2002 CATIE 2003	Marchamalo 2004, 2007	Lianes 2009
Bosque Bosque primario Bosque natural Selva virgen Bosque denso Bosque claro, substrato herbáceo denso Bosque claro, substrato herbáceo degradado Bosque secundario Charral, pasto Charral Bosque degradado	0,0001 0,018	0,003 0,001 0,007	0,001- 003	0,003-0,010 0,003-0,010 0,010-0,100	0,003 0,012	0,003 0,037
Matorral,/pastos Matorral denso Matorral claro, substrato herbáceo denso Matorral claro, substrato herbáceo degradado Páramo Pasto Pasto (natural o mejorado) Vegetación natural baja (altura. 50cm) Pastizal natural completo Pastizal natural pastoreado Pastizal cultivado (manejado) Pasto de corta Potrero Potrero carga normal Potrero degradado Potrero muy degradado		0,009 0,008 0,012	0,01- 0,015	0,003-0,030 0,003-0,030 0,030-0,100 0,003-0,040 0,030-0,010 0,040-0,200 0,003-0,040	0,013	0,012 0,013 0,002 0,002 0,016
Cultivos permanentes Café, café con macadamia o pejibaye Cultivos perennes Café Banano Cacao Cultivos permanentes asociados (densos) Cultivos permanentes no densos Huertos de subsistencia Árboles frutales	0,300	0,079 0,09 0,062 0,05	0,086	0,010-0,300 0,100-0,450 0,300-0,900	0,080	0,003
Cultivos anuales Caña, caña brava Cultivos anuales Papa-zanahoria o papa-cebolla Maiz Tomate/chile dulce Caña Cultivos anuales de ciclo corto(1-6 meses) Cultivos anuales de ciclo largo (6 meses) Cultivos (cobertura baja) Cultivos (cobertura media) Cultivos (cobertura alta) Papa-brócoli Papa-zanahoria Papa-zanahoria-papa Papa-papa-brócoli Papa-zanahoria-brócoli	0,050	0,495 0,615 0,519 0,502 0,263	0,340	0,300-0,800 0,400-0,900	0,050 0,650 0,500 0,400	0,260 0,300 0,390 0,390 0,360

Fuente: Lianes et al. (2009).

Cuadro 4. Valores de erosividad de la lluvia por microcuenca. Cuenca del río Pixcayá.

Nombre	Min	Max	Media	DS
Río Chicoj	5608	5929	5701	72
Pixcaya Alto	6390	7054	6743	171
Xetomax	6369	7058	6740	160
Comalapa	5922	6270	6105	80
Panabajal	6041	6608	6265	128
Pacorral Bajo	5982	6786	6428	196
Balanya Alto	6147	7359	6804	261
Paxilon	5862	6793	6372	255
Pixcaya Medio	5738	6517	6042	203
Balanya Bajo	5691	6341	5960	158
Río El Sitán	6145	7338	6791	286
Yerbabuena	5578	6622	5973	276
Pachoj	5604	7435	6197	455
Pacorral Alto	6272	6900	6619	166
Sochal	5607	5796	5687	52
Esbaquiej	5656	5835	5751	42
Pixcaya Bajo	5581	5656	5601	13
Chuanimoche	5620	5768	5691	37

del municipio de Santa Cruz Balanyá, hasta valores de 7,434 $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en las partes altas de las montañas, al norte y al sur de la cuenca. En la Figura 2, se puede observar la distribución espacial del valor de erosividad de la lluvia y el

Cuadro 6 contiene los valores de erosividad: máximo, mínimo, promedio y la desviación estándar, para cada una de las microcuencas de la cuenca del río Pixcayá.

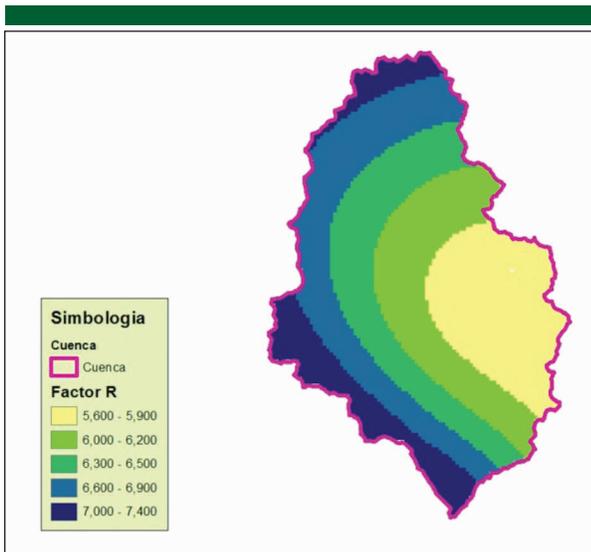


Figura 2. Erosividad de la lluvia Factor R. Cuenca del río Pixcayá.

Cuadro 5. Valor ponderado de la erorabilidad por microcuenca. $[(\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}) * (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})]$

Nombre	Max	Media	DS
Río Chicoj	0.003	0.05	0.026775
Pixcaya Alto	0.003	0.038	0.033161
Xetomax	0.003	0.038	0.032388
Comalapa	0.004	0.033	0.022835
Panabajal	0.004	0.038	0.025042
Pacorral Bajo	0.003	0.033	0.025134
Balanya Alto	0.004	0.037	0.031853
Paxilon	0.003	0.033	0.027905
Pixcaya Medio	0.004	0.038	0.018622
Balanya Bajo	0.003	0.045	0.024875
Río El Sitán	0.003	0.045	0.030584
Yerbabuena	0.016	0.33	0.030348
Pachoj	0.025	0.05	0.031404
Pacorral Alto	0.004	0.045	0.028857
Sochal	0.036	0.036	0.036
Esbaquiej	0.004	0.037	0.018677
Pixcaya Bajo	0.025	0.05	0.036891
Chuanimoche	0.004	0.037	0.029291

Factor K erorabilidad del suelo

La erorabilidad del suelo en la cuenca tiene una media de 0.02846 $[(\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}) * (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})]$ y con valor máximo de 0.327 $[(\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}) * (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})]$ y mínimo de 0.001 $[(\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}) * (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})]$; la distribución espacial de la erorabilidad se puede observar en la Figura 3, los valores de la erorabilidad: máxima, media y la desviación estándar, para cada una de las microcuencas analizadas se puede observar en el Cuadro 5.

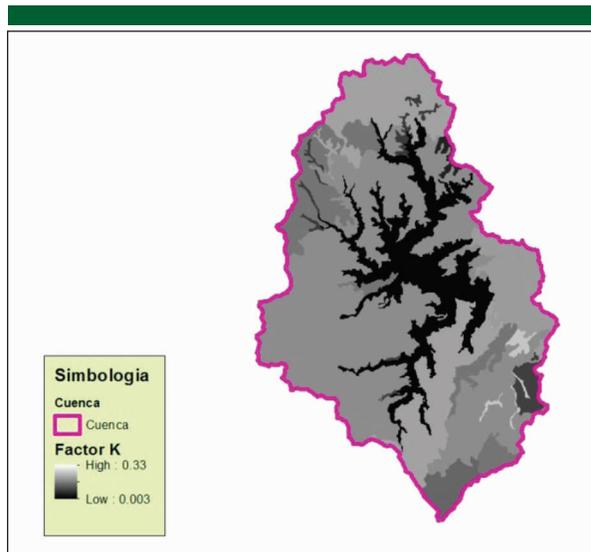


Figura 3. Distribución espacial de la erorabilidad, factor K. Cuenca del río Pixcayá.

Factor LS longitud y gradiente de la pendiente (Adimensional)

Este factor representa el efecto que la topografía tiene en el proceso de la erosión hídrica. El valor medio en la cuenca es de 3.65 con valores máximos de 20.99 y mínimos de 0.03, guardando una correlación con la geomorfología, en la zona en donde predominan los paisajes de laderas con fuertes pendientes predominan los valores altos y en los paisajes de terrazas con pendiente suave y moderada se presentan los valores bajos. Este factor puede ser exagerado al modelarlo utilizando SIG para los sitios en donde se tienen pendientes fuertes, por lo tanto se utilizó el criterio de poner un límite de 21 a los sitios que tienen valores por encima de este valor. En la Figura 4 se puede observar la distribución espacial del factor LS y en el Cuadro 6 se presentan los resultados de la distribución del factor a nivel de la microcuenca, considerando los valores máximo, mínimo, medio y la desviación estándar.

Factor C del cultivo

El factor C para la cuenca concuerda con el uso predominante que se tiene, el cual corresponde a agricultura, el valor medio del factor C es de 0.2523 y el valor máximo es de 0.5, el valor mínimo es de 0.001. La distribución espacial del factor C del cultivo se presenta en la

Figura 5 y los valores del factor C a nivel de las microcuencas se encuentra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Valor ponderado del factor C por microcuenca. (Adimensional).

Nombre	Min	Max	Media	DS
Río Chicoj	0	0.5	0.212667	0.214336
Pixcaya Alto	0.001	0.5	0.10134	0.197531
Xetomax	0.001	0.5	0.199254	0.24138
Comalapa	0	0.5	0.21764	0.205137
Panabajal	0.001	0.5	0.280769	0.211486
Pacorrall Bajo	0.001	0.5	0.290807	0.204981
Balanya Alto	0	0.5	0.363117	0.125204
Paxilon	0	0.5	0.320901	0.180684
Pixcaya Medio	0.001	0.5	0.194583	0.205412
Balanya Bajo	0	0.5	0.267695	0.199456
Río El Sitán	0	0.5	0.288551	0.183109
Yerbabuena	0	0.5	0.282992	0.187421
Pachoj	0	0.5	0.232536	0.211148
Pacorrall Alto	0.001	0.5	0.27314	0.231609
Sochal	0.002	0.5	0.152474	0.225512
Esbaquiej	0.001	0.5	0.136789	0.197928
Pixcaya Bajo	0.002	0.5	0.063408	0.147475
Chuanimoche	0.001	0.5	0.116	0.180184

Cuadro 6. Valor ponderado del factor LS por microcuenca. (Adimensional).

Nombre	Min	Max	Media	DS
Río Chicoj	0.03	20.80816	4.429166	3.514998
Pixcaya Alto	0.03	20.93815	6.023606	2.576294
Xetomax	0.03	20.77558	5.195453	2.583392
Comalapa	0.03	20.51631	2.873674	3.090782
Panabajal	0.03	20.62316	3.881436	3.114555
Pacorrall Bajo	0.03	20.78868	4.139657	2.86124
Balanya Alto	0.03	20.91511	1.245555	1.949129
Paxilon	0.03	20.90018	2.757777	2.751562
Pixcaya Medio	0.03	20.85516	4.511751	3.539692
Balanya Bajo	0.03	20.96452	2.896878	3.448831
Río El Sitán	0.03	20.99369	2.437588	2.634616
Yerbabuena	0.03	20.87877	2.945759	2.673456
Pachoj	0.03	20.94133	3.874467	3.075927
Pacorrall Alto	0.03	20.81033	4.558749	2.5008
Sochal	0.03	20.96674	5.611579	2.851982
Esbaquiej	0.03	20	5.622958	3.23014
Pixcaya Bajo	0.03	20	6.642264	3.230518
Chuanimoche	0.03	20.00735	5.86699	3.235989

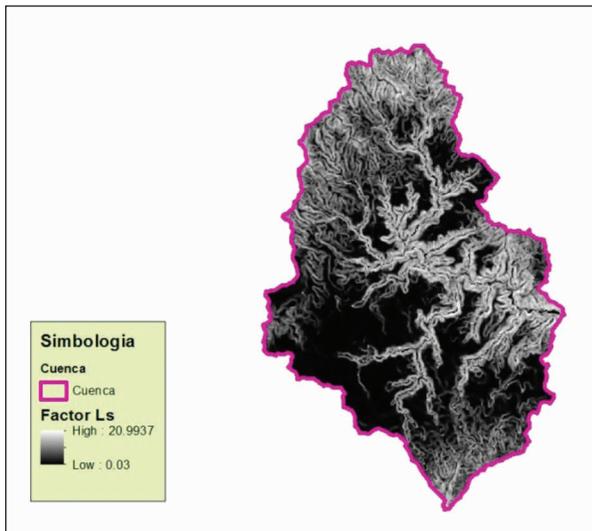


Figura 4. Distribución espacial del factor LS. Cuenca del río Pixcayá. (Adimensional)

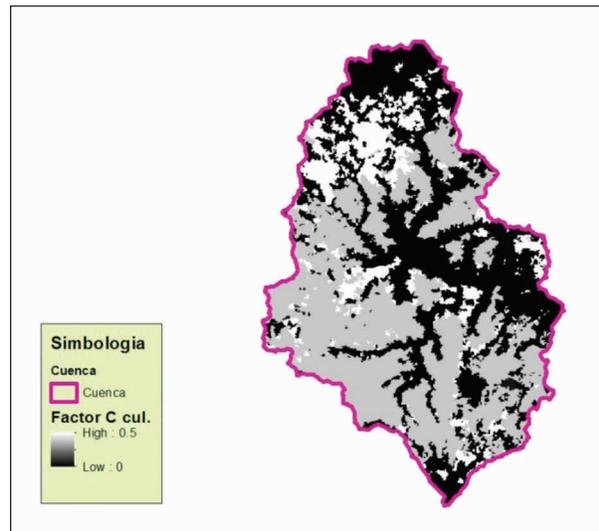


Figura 5. Distribución del factor C. Cuenca del río Pixcayá.

Erosión Potencial en la cuenca del río Pixcayá método USLE

La erosión potencial media en la cuenca del río Pixcayá es de 120 ($T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), la distribución porcentual de la erosión de acuerdo al sistema de clasificación de erosión empleado por FAO et al (1980), muestra que el 71% del territorio presenta una tasa de erosión leve, lo cual es consistente con la topografía predominante en la cuenca, ya que el 59% tiene una pendiente menor 26% y al comportamiento erosivo de las lluvias con un valor de erosividad R medio de $6,432 MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$ (Figura 6). En la Figura 7 se presentan la distribución porcentual de la erosión de acuerdo a las clases de erosión, el territorio afectado por una erosión severa es solamente el 3% lo cual equivale a 435 hectáreas.

El comportamiento de la erosión por microcuenca permite visualizar que la pérdida media de suelo en 16 de las 18 microcuencas analizadas supera las $50 T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, y en

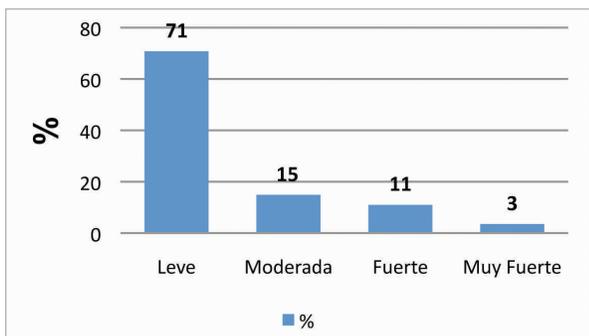


Figura 7. Distribución porcentual de la erosión de acuerdo a la clase de erosión

9 supera las $100 T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$. El volumen de suelo erosionado en la cuenca del río Pixcayá es de 0.801 millones de $T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, la cuenca que más aporta erosión es Pacorrall Alto, con $91,566 T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, a su vez es la microcuenca que presentó el valor más alto de erosión medio con $240.9 T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ (Cuadro 8).

Producción de sedimentos en la cuenda del río Pixcayá, Método MUSLE

Los sedimentos producidos en la cuenca alcanzan en promedio un valor anual de 0.18 millones de toneladas al año, lo cual tiene repercusiones en la calidad del agua, la microcuenca que aporta la mayor cantidad de sedimentos es la microcuenca Balanyá Alto, con un aporte de 26,314 toneladas por año. Los sedimentos son considerados la principal fuente de aporte de nutrientes y contaminantes agrícolas en los cuerpos de agua especialmente por el transporte de partículas de suelos y los elementos adheridos a estas.

Los resultados de la producción de sedimentos a nivel de cada una de las microcuencas se puede observar en el Cuadro 9. Los sedimentos producidos por hectárea por año varían de $4.13 T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, hasta casi $20 T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, dichos valores son altos considerando que la mayor parte del territorio tiene una baja erosión, por lo tanto la producción de sedimentos está concentrada en sitios específicos de las microcuencas.

Las microcuencas que aportan la mayor cantidad de sedimentos se encuentran ubicadas al sureste del área de estudio, como puede observarse en la Figura 8.

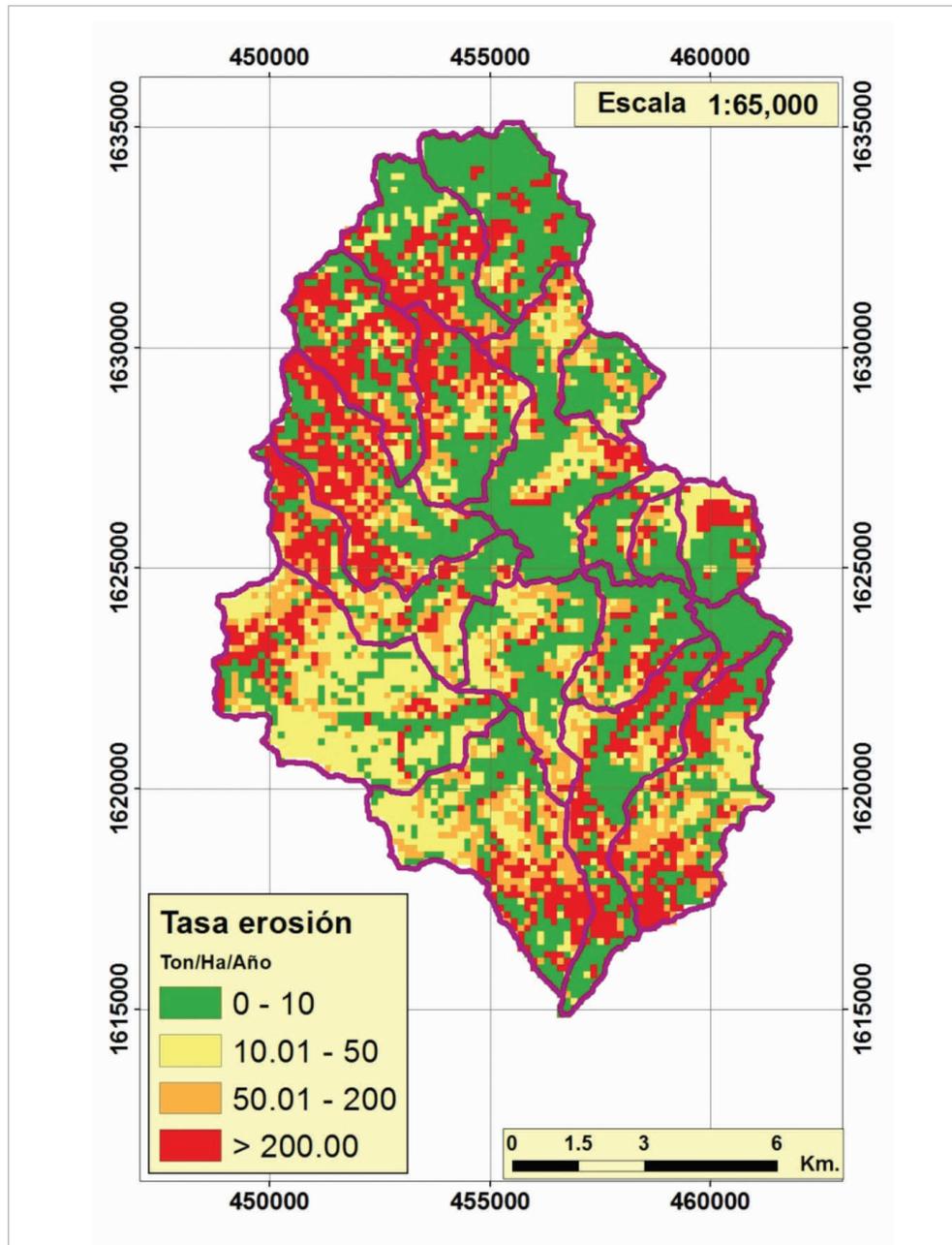


Figura 6. Distribución de la erosión potencial en la cuenca del río Pixcayá.

Discusión

Los valores de erosión media en la cuenca del río Pixcayá, muestran que se tiene una erosión alta con valores de $120 \text{ T*ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, a pesar de que los valores de la erosividad de la lluvia (en promedio $6,432 \text{ MJ*mm*ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{año}^{-1}$) son relativamente bajos en comparación con otras zonas del país (valores de hasta $34,000 \text{ MJ*mm*ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{año}^{-1}$). A nivel de microcuenca, Xetomax tienen el valor más alto de erosión con

un valor medio de $240 \text{ T*ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Las microcuencas que presentan una topografía con fuertes pendientes y uso de la tierra predominante con cultivos anuales y pastos (Figura 9), tienen los mayores valores de erosión.

La producción de sedimentos tiene un valor máximo de $19.93 \text{ T*ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en la microcuenca Xetomax y el valor medio es de $11.92 \text{ T*ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, esto guarda una correlación directa con la producción de escorrentía, por lo tanto se incrementa en los

Cuadro 8. Distribución de la erosión por microcuenca, media, desviación estándar y volumen de suelo erosionado en T*Ha⁻¹año⁻¹.

Microcuenca	Media T*Ha ⁻¹ año ⁻¹	Desv Est. T*Ha ⁻¹ año ⁻¹	Total T*año ⁻¹
Río Chicoj	79.12	157.49	19,938.30
Pixcaya Alto	97.30	236.76	39,016.03
Xetomax	197.53	294.43	73,874.64
Comalapa	47.33	99.11	7,761.96
Panabajal	147.75	196.99	50,825.34
Pacorral Bajo	186.49	212.60	91,565.51
Balanya Alto	73.93	120.12	59,440.52
Paxilon	128.08	158.72	55,587.44
Pixcaya Medio	68.73	137.97	38,626.86
Balanya Bajo	52.33	98.47	20,931.68
Río El Sitán	111.55	161.50	68,157.97
Yerbabuena	145.20	192.32	75,940.02
Pachoj	146.17	210.16	69,574.91
Pacorral Alto	240.87	271.65	89,121.07
Sochal	130.83	222.19	23,288.19
Esbaquiej	60.86	140.41	7,181.79
Pixcaya Bajo	49.21	129.93	5,265.13
Chuanimoche	57.79	116.17	5,201.19
Total cuenca	801,298.54		

Cuadro 9. Distribución de la producción de sedimentos pro microcuenca, Caudal escurrido, caudal pico instantáneo.

Microcuenca	Q (mm)	Q (m³)	qp (m³/s)	Sedimentos (T*ha ⁻¹)	Sedimentos (T*año)
Río Chicoj	249.18	3,216,822.16	36.16	10.94	3,629.39
Pixcaya Alto	485.62	4,577,487.59	23.02	12.70	11,773.80
Xetomax	486.44	4,222,425.10	19.61	19.93	17,134.65
Comalapa	371.69	1,427,636.56	3.97	4.13	1,550.07
Panabajal	353.82	2,751,151.15	15.08	11.59	9,011.66
Pacorral Bajo	376.41	4,290,933.66	25.80	15.16	17,202.82
Balanya Alto	421.51	8,085,542.19	117.56	13.86	26,314.08
Paxilon	388.18	3,903,266.89	25.47	13.25	13,228.71
Pixcaya Medio	312.98	4,056,141.43	22.86	6.44	8,312.90
Balanya Bajo	320.33	2,898,965.86	16.91	7.55	6,822.80
Río El Sitán	443.13	6,552,708.61	57.86	15.57	22,757.51
Yerbabuena	297.04	3,628,620.38	29.27	10.44	12,536.74
Pachoj	326.47	3,592,718.09	40.69	15.73	17,193.36
Pacorral Alto	383.76	3,295,284.57	16.61	16.23	13,832.03
Sochal	205.94	861,998.36	3.64	5.36	2,191.21

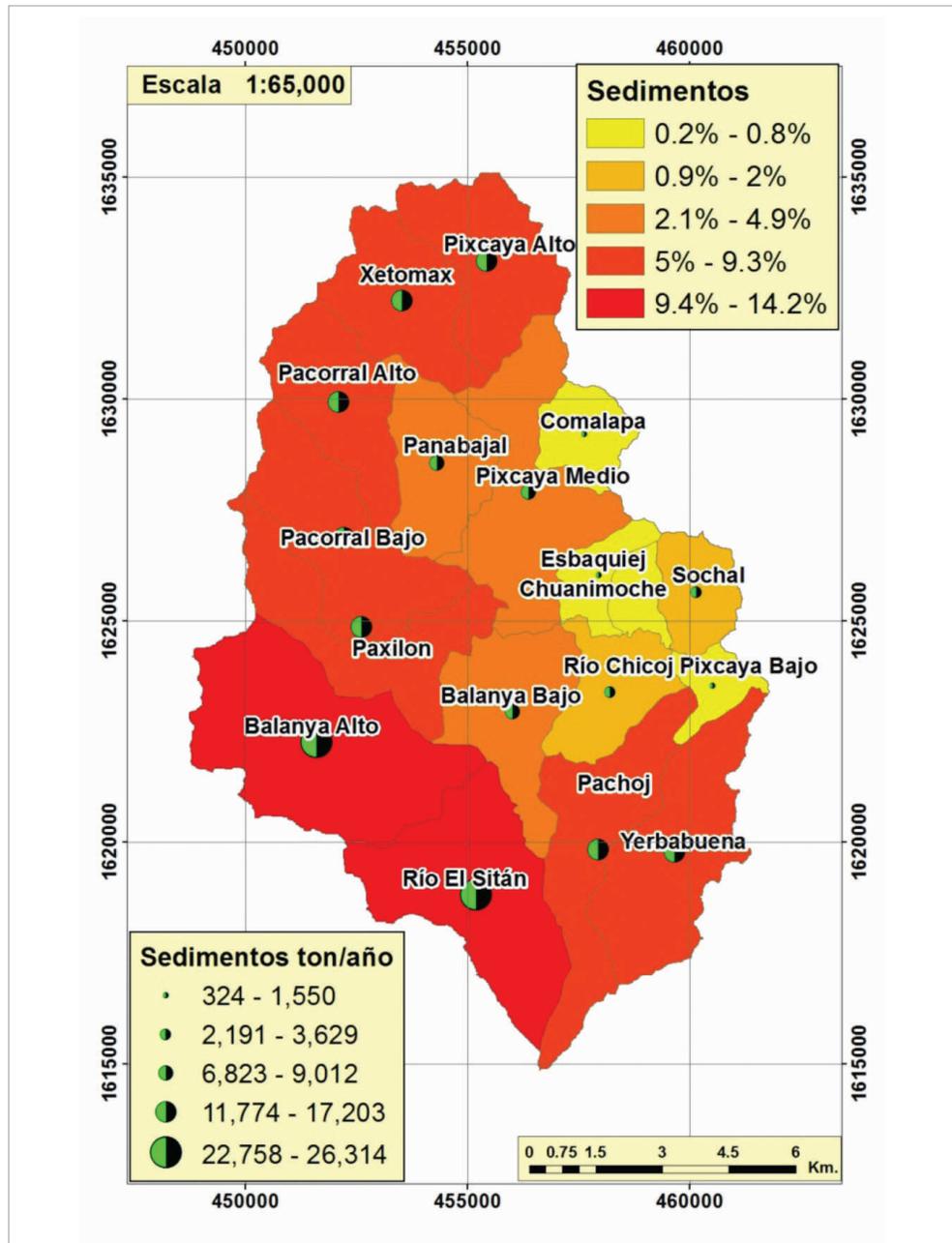


Figura 8. Microcuencas y producción de sedimentos.

meses en los cuales se tiene una mayor precipitación. Los meses que muestran la mayor producción de sedimentos ($7 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) son: junio y septiembre (Figura 10), este valor representa el 60% de la producción anual de sedimentos.

Considerando opciones de gestión de la cuenca enfocados en la reducción de la erosión y la producción de sedimentos se analizaron dos escenarios de manejo en la cuenca:

1. Implementación de prácticas de conservación de suelos en las áreas con pendientes fuertes y que actualmente tienen usos de la tierra agrícola. (9,270 ha).
2. Conversión de las tierras que de acuerdo a la capacidad de uso de la tierra deberían tener un uso forestal y que actualmente tienen usos agrícolas (319 ha).

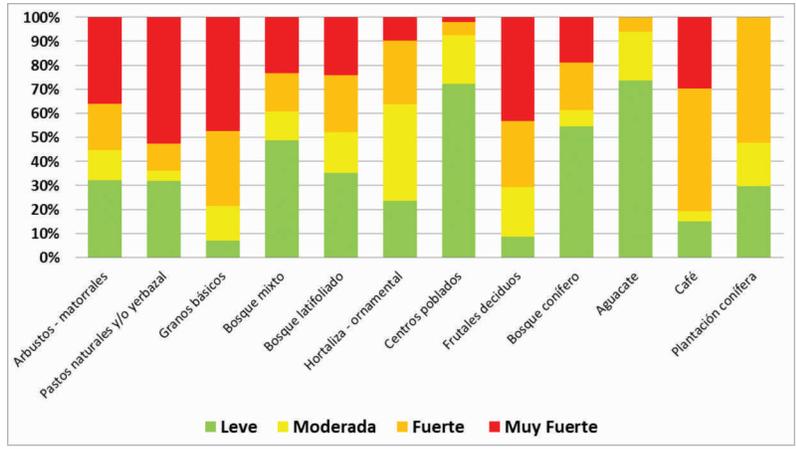


Figura 9. Distribución de categorías de erosión por uso de la tierra.

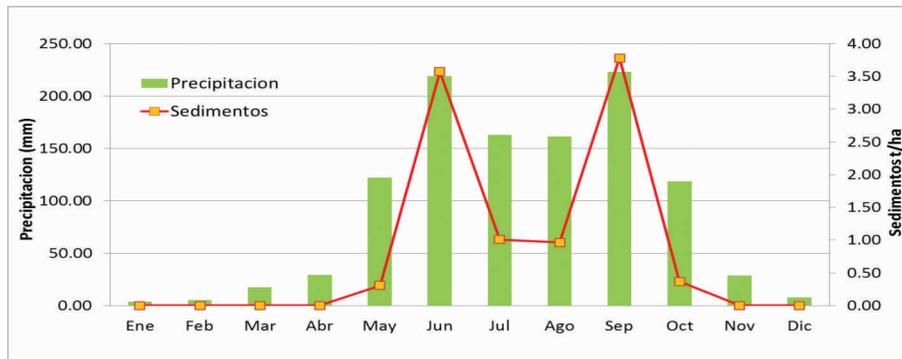


Figura 10. Precipitación mensual y producción de sedimentos.

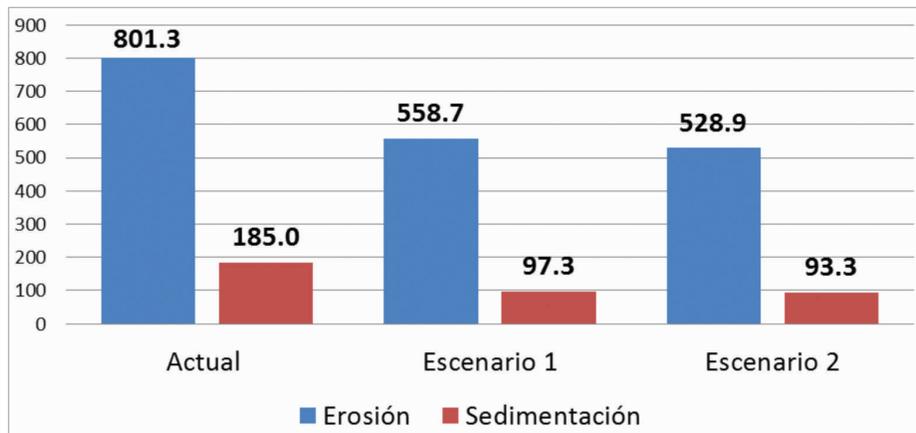


Figura 11. Comparación de la erosión y producción de sedimentos situación actual, escenario 1 y escenario 2 (miles de toneladas por año).

Los resultados muestran un efecto significativo con la implementación de prácticas de conservación de suelos con lo cual se logra una disminución del 50% de la producción de sedimentos (Escenario 1), la implementación del Escenario 2 a nivel de la cuenca muestra un resultado marginal, posiblemente debido a que el área considerada para realizar el cambio de uso de la tierra representa menos del 2% del área total. La Figura 11, muestra los resultados con el modelo actual y los escenarios analizados.

Conclusiones

El valor de erosividad en la cuenca del río Pixcayá, factor R ($6,432 \text{ MJ*mm*ha}^{-1}\text{*h}^{-1}\text{*año}^{-1}$), es relativamente bajo de acuerdo con los valores reportados por Bravo et al. (1989), quienes presentan valores para Guatemala desde $2,000 \text{ MJ*mm*ha}^{-1}\text{*h}^{-1}\text{*año}^{-1}$, hasta $34,000 \text{ MJ*mm*ha}^{-1}\text{*h}^{-1}\text{*año}^{-1}$.

El valor medio de la erosión potencial en la cuenca del río pixcayá es de $120 \text{ (T*Ha}^{-1}\text{*año}^{-1})$, equivalente a una lámina media de suelo perdido por año equivale a 9.2 mm por año, los factores que tienen una mayor incidencia en el valor de la erosión son: topografía (factor LS) y uso de la tierra (factor C).

Un tercio de los suelos corresponden al uso de la tierra de granos básicos: el cual aporta un total de 255 mil toneladas por año de sedimentos, conformado principalmente por cultivos de maíz y frijol en asocio.

La erosión y la producción de sedimentos se pueden disminuir en un 50 % con la implementación de prácticas y obras de conservación de suelos.

Bibliografía

- INSIVUMEH (Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología) (Cartographer) (2014) *Mapas Climáticos en formato Raster de Guatemala* (Lluvia, Precipitación). Retrieved from <http://www.insivumeh.gob.gt/estacionesmet.html>
- Lianes E., Marchamalo M., Soriano M.R. (2009) *Evaluación del factor C de la rusle para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica* Agronomía Costarricense: Revista de Ciencias Agrícolas 33: 217-235.
- Lombardi Neto F., Moldenhauer W.C. (1992) *Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)* Bragantia 51: 189-196.
- MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación) (2006) *Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala Año 2003 (Incluye 5 cultivos permanentes actualizados al año 2005)* Retrieved from Guatemala.
- MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación) (Cartographer) (2007) *Modelo de Elevación Digital de la República de Guatemala*.
- MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación) (2010) *Estudio Semidetallado de los Suelos del Departamento de Chimaltenango, Guatemala*.
- Mockus V. (1969) *Hydrologic soil-cover complexes* SCS National Engineering Handbook: Section 4. Hydrology 10.11-10.24.
- Municipalidad de Guatemala. (2014) *Sistema Xayá Pixcayá y Planta de Tratamiento Lo de Coy*. Retrieved from <http://mu.muniguatate.com/index.php/component/content/article/40-empagua/48-xayapixcayacoy>
- Suárez d.C.F. (1980) *Conservación de suelos* IICA, San José, Costa Rica.
- Velásquez S. (2008) *Erosión de suelos utilizando la RUSLE* Retrieved from Costa Rica.
- Williams J. (1977) *Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models* IAHS Publ, 122: 168-179.
- Williams J. (1990) *The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history* Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 329 (1255), 421-428.
- Wischmeier W.H. Smith D.D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning* International Association of Scientific Hydrology.
- Arnoldus H., Boodt M. d., Gabriels D. (1980) *An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation* Assessment of erosion 127-132.
- Bravo M., Chonay J., González F. A. (1989) *Estudio preliminar de la erosividad de las lluvias en la república de Guatemala* Tikalia 10
- Desmet P, Govers G. (1996) *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units* Journal of Soil and Water Conservation 51: 427-433.
- ESRI (2012) *Spatial Analyst (Tutorial)* Retrieved from Guatemala.
- IARNA-URL (2009) *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009. Las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo* Retrieved from Guatemala.
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (2003) *XI Censo de población y IV de habitación 2002. Características de la población y de los locales de habitación censados* Guatemala
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (Cartographer) (2004) *Mapa de lugares poblados*.