

Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG).
Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en
Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad
Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 14, Número 24, 2022, Sección I: Artículos. pp. 1-22

EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA ZONA CENTRO DE MÉXICO. CUENCA VALLE DE BRAVO – AMANALCO

**Jocksan Edrey Reyes Andrade - Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo - Salvador Adame
Martínez**

Universidad Autónoma del Estado de México

jocksanreyes.14@gmail.com

RESUMEN

La Cuenca Valle de Bravo - Amanalco (CVBA), es importante por la captación y aportación de agua, abastece a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y a la Ciudad de Toluca. El objetivo de este trabajo fue analizar la erosión del suelo en los periodos 2005 y 2021. La metodología consistió en emplear la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo modificada por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), la cual se adaptó a un Sistema de Información Geográfico. Los resultados muestran que la mayor parte de la cuenca presenta una erosión moderada, en la zona oeste de la Presa Valle de Bravo, derivado de la deforestación y los cambios de uso de suelo. Esta metodología en comparación con el método tradicional permitió calcular la tasa de pérdida de suelo por medio de un despeje matemático del factor LS. Se concluye que la zona de estudio presenta una pérdida de suelo moderada, sin embargo, se requiere establecer prácticas y obras de conservación de suelos como medida preventiva para evitar su deterioro.

Palabras clave: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, Cuenca, Erosión del suelo, Retención del suelo, Valle de Bravo.

ABSTRACT

The Valle de Bravo - Amanalco watershed (CVBA) is important for its water catchment and contribution, supplying the Metropolitan Zone of Mexico City and the City of Toluca. The objective of this project was to analyze soil erosion in the periods 2005 and 2021. The methodology consisted of using the Universal Soil Loss Equation modified by the Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), which was adapted to a Geographic Information System. The results show that most of the watershed shows moderate erosion, in the area west of the Valle de Bravo Dam, because of deforestation

and changes in land use. This methodology, in comparison with the traditional method, allowed calculating the soil loss rate by means of a mathematical clearance of the LS factor. It is concluded that the study area presents a moderate soil loss; however, it is necessary to establish soil conservation practices and works as a preventive measure to avoid soil deterioration.

Keywords: Universal Soil Loss Equation, Watershed, Soil erosion, Soil retention, Valle de Bravo.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Valle de Bravo Amanalco (CVBA), es estratégica a nivel nacional por su capacidad para producir agua. La presa de Valle de Bravo es la que más agua produce en comparación de las seis que conforman el Sistema Cutzamala. Este sistema abastece el 40% del agua potable consumida en el Área Metropolitana de la Ciudad de México y Toluca, provee agua para más de dos millones de personas, es importante debido a las funciones ambientales que representa (Bonfil & Madrid, 2006; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012). Además, la Cuenca es de gran importancia por su diversidad en flora y fauna.

Derivado de su biodiversidad, potencial paisajístico y recreativo, la importancia que brindan sus cuerpos de agua y belleza escénica han permitido el desarrollo turístico a nivel internacional; la altimetría y las variaciones del relieve originan una diversidad de climas, lo que permite que se lleven a cabo actividades como: la agricultura, ganadería, el aprovechamiento forestal, acuacultura, actividades turísticas, comerciales y de servicios, manantiales y presas enclavados en grandes extensiones de bosque; así mismo sus bosques constituyen un elemento esencial en el control hidrológico favoreciendo la generación de servicios ambientales como la retención y aportación de agua, además son el hábitat para muchas especies de aves migratorias, así como de la mariposa monarca y de varias especies endémicas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012; Secretaría de Ecología, 2003b; Sierra López *et al.*, 2011).

De acuerdo con el IMTA (2012), la Cuenca presenta signos evidentes de deterioro ambiental, debido al crecimiento urbano y asentamientos humanos que no cuentan con servicios básicos. El desarrollo turístico de la Cuenca y su consiguiente desarrollo económico han ocasionado la alteración del medio ambiente favoreciendo la deforestación, la erosión del suelo, la invasión de la zona federal, la pérdida de la biodiversidad, el aumento de zonas de mayor riesgo y vulnerabilidad ante fenómenos meteorológicos. De la problemática antes mencionada en el presente trabajo se aborda la erosión del suelo, ya que es un factor esencial que contribuye a los problemas medioambientales y socioeconómicos en todo el mundo. La degradación de la tierra y el deterioro de su calidad es un problema grave que amenaza a muchas zonas del mundo (Lovera Pons *et al.*, 2018; Secretaría de Ecología, 2003a; Tseganeh & Arega, 2021).

La erosión del suelo, como causa de la degradación de la tierra, influye en gran medida en la calidad del agua, la sedimentación en los ríos y en las zonas de captación de agua, conlleva a una pérdida de almacenamiento en los embalses y reduce la vida útil de las presas. La gravedad y la frecuencia de la erosión varían en función del suelo, el clima, la forma del terreno y diversos factores socioeconómicos (Tseganeh & Arega, 2021). La

erosión hídrica es responsable de la eliminación de la capa superior del suelo más fértil y ello provoca disminución de la productividad agrícola y por ende una disminución en el rendimiento de los cultivos debido a la reducción de nutrientes y la productividad (Elnashar *et al.*, 2021; Lovera Pons *et al.*, 2018; Secretaría de Ecología, 2003a).

Si bien existen diversas metodologías que permiten conocer, evaluar y predecir la erosión del suelo en un área determinada, la baja disponibilidad de información a nivel local para algunos factores de la ecuación o la complejidad para incorporar los algoritmos que permitan calcular el factor LS con su concepción original para incorporarlo a un SIG, hacen más tardado y costoso el este proceso de análisis (Bhuyan *et al.*, 2002; Flores López *et al.*, 2003). Esta metodología permitió evaluar de forma indirecta las tasas de pérdida de suelo de forma rápida por medio de un despeje matemático de LS, permitiendo conocer de esta forma las áreas que requieren conservación.

En el área de estudio los cuerpos de agua de la Cuenca han disminuido su capacidad de almacenamiento hasta en 1.7 millones de metros cúbicos al año, debido al arrastre de sedimentos por erosión al igual que la disminución del caudal de manantiales y ríos, el área de estudio es vulnerable al proceso erosivo debido a sus características físico-geográficas y los suelos susceptibles a las altas precipitaciones por su relieve accidentado, además de inadecuadas prácticas agropecuarias de uso y manejo del suelo, impactando negativamente incluso en el turismo (Secretaría de Ecología, 2003a).

Ante esta problemática, el objetivo de este estudio es determinar el grado de erosión del suelo en la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco mediante la integración de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo modificada y adaptada a las condiciones geográficas de México por Figueroa *et al.* (1991), y adaptada en este trabajo con el Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta ecuación fue desarrollada en 1956 por Wischmeier y Smith, más tarde en 1980 fue modificada por la FAO, posteriormente el Colegio de Postgraduados adaptó la ecuación para que fuera aplicada en México y desde 1992 la ecuación es usada por la SADER para definir terrenos altamente erosionables en México.

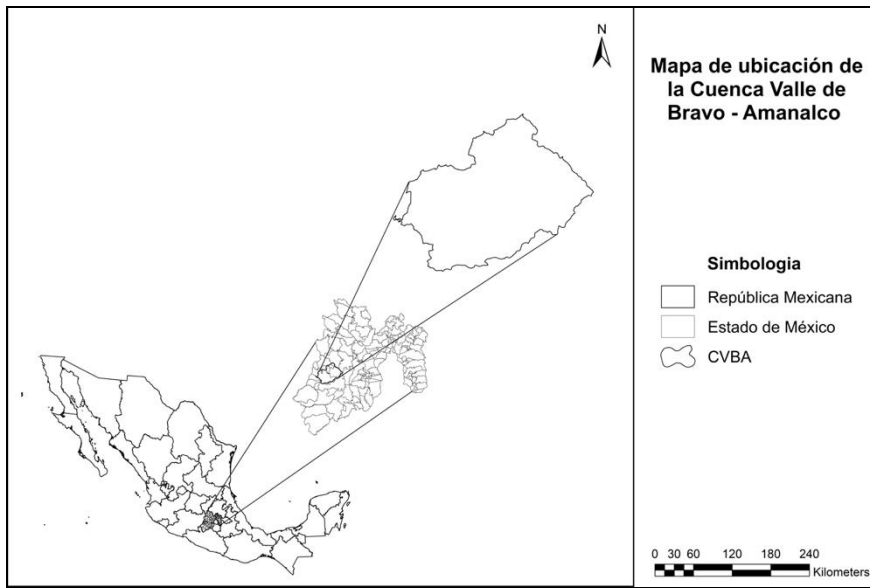
Los SIG han demostrado ser una herramienta útil en las estimaciones, ya que permite procesar, manipular y visualizar bases de datos, y son una buena alternativa de apoyo en la planificación y gestión de recursos naturales, entender la tasa de erosión del suelo (espacial, cuantitativa y cualitativamente), es fundamental para conocer las áreas con degradación de la tierra, las áreas de suelo erosionado que se pueden restaurar y así reducir los riesgos los ecosistemas (Eniyew *et al.*, 2021; Nájera González *et al.*, 2016).

METODOLOGÍA

Área de estudio

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), en México existen 37 regiones hidrológicas, la Cuenca Valle de Bravo - Amanalco forma parte de la Región Hidrológica 18 (Figura 1).

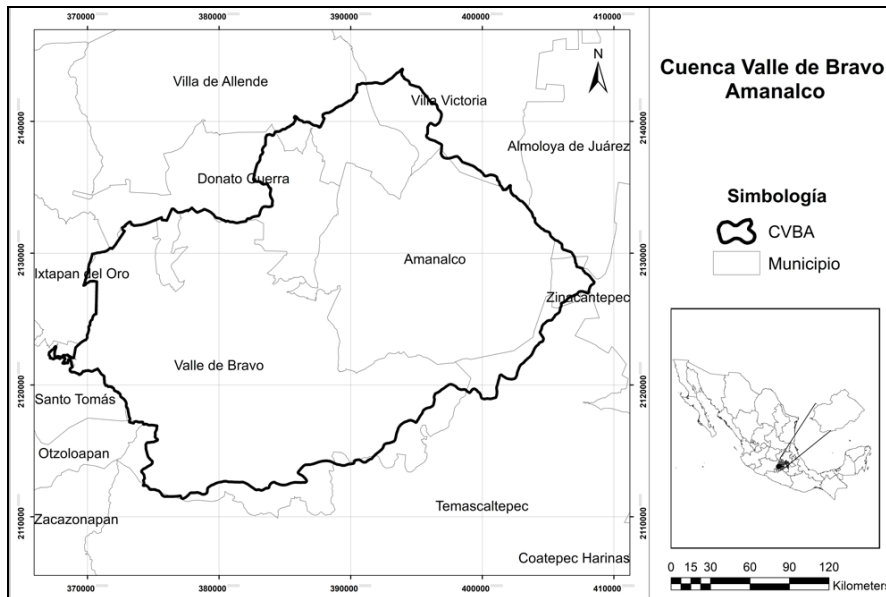
Figura 1. Ubicación de la Subcuenca Valle de Bravo – Amanalco, México.



Fuente: Elaboración del autor con base a INEGI (2021).

Se encuentra ubicada al poniente del Estado de México, incluye ocho municipios mexiquenses que son: Valle de Bravo, Amanalco, Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec, tiene una superficie de 72 555.54 hectáreas (Figura 2).

Figura 2. Cuenca Valle de Bravo – Amanalco, México.



Fuente: Elaboración del autor con base a INEGI (2021).

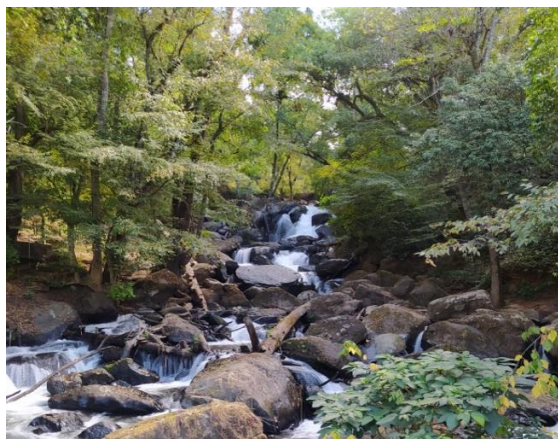
Cuenta con nueve áreas naturales protegidas (ANP) que son: Parque Nacional Nevado de Toluca; Reservas ecológicas estatales de Monte Alto, Cerro Colorado y Cerro

Cuautlenco; y finalmente las cimas de montañas de Ixtapan del Oro, Pinal del Marquezado, Cerro Gordo Sacametate, Cerro los Reyes y Cerro el Idolo – Piedra Herrada (Figuras 3 y 4). La fisiografía es de un un relieve accidentado que se caracteriza por cerros, mesas y laderas abruptas entre 1.100 y 3.730 msnm, que generan vulnerabilidad en la zona de estudio y la vuelven susceptible a la erosión.

Figura 3. Presa Valle de Bravo a un cuarenta porciento de su capacidad.



Figura 4. Cascada Velo de Novia.



Fuente: Fotografías del autor.

La zona de estudio presenta tres regiones climatológicas, la mayor parte de la Cuenca presenta clima templado subhúmedo (Cw2) (2 200 a 3 000 msnm); en el poniente presenta el clima semicálido (A)Cw1 (cota menor a los 2 200 msnm) y en el extremo oriente clima semifrío subhúmedo (C)(E) w2 (arriba de 3 000 msnm). Los suelos de la Cuenca se derivan de materiales volcánicos de diferentes edades y están formados por materiales minerales y orgánicos, así como organismos vivos. En orden de desarrollo destacan: Acrisol háplico y Luvisol crómico (los más evolucionados), los Cambisoles, Andosoles (típicos de las zonas forestales), Phaeozem háplicos, los Leptosoles (poco desarrollados) y los Regosoles (los menos desarrollados) con base a la clasificación FAO/UNESCO.

Materiales

Información Cartográfica: Factor R; mapa ubicación espacial de las estaciones (SMN), Factor K; Cartas Edafológicas con clave: Villa de Allende E14A-36, San Miguel Zinacantepec E14A-37, Valle de Bravo E14A-46, Volcán Nevado de Toluca E14A-47, (Escala: 1/50 000 del INEGI), Factor LS; Carta topográfica en formato vectorial, (Escala: 1/50 000 del INEGI), Factor C; imágenes de satélite Landsat Thematic Mapper (TM) 2005 y Landsat OLI 2017 y las cartas de uso de suelo y vegetación Series III y VI del INEGI (Escala: 1/50 000 del INEGI).

Parámetros de las imágenes: Datum de referencia WGS 84, se re proyectaron a tamaño de celda de 15 m para las imágenes de satélite y 20 m para las imágenes ráster de la EUPS, proyección UTM (Universal Transversal Mercator), Zona 14 Norte.

Información de Precipitación: Precipitaciones media anual (Servicio Meteorológico Nacional y CLICOM).

Software: ArcGIS versión 10.6.

Método

Para calcular la pérdida de suelo por erosión hídrica se aplicó el método denominado Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) (Bueno-Hurtado *et al.*, 2016; Wischmeier & Smith, 1978). La expresión de esta ecuación es:

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

Donde A es la pérdida de suelo por unidad de superficie (tn/ha.año), R es el factor lluvia o índice de erosión pluvial (MJ. mm /ha h), K es el factor erodabilidad del suelo (tn. ha.h/ha.MJ.mm) y depende fuertemente de la textura de los suelos, la que no puede ser fácilmente mejorada, L es el factor longitud de pendiente (adimensional), S es la pendiente (adimensional), C es el factor de cobertura vegetal y P es el factor prácticas de cultivo.

Esta ecuación fue diseñada para la predicción de la erosión en suelos preferentemente agrícolas y con base anual. No obstante, contiene algunos índices y factores que, con la debida adaptación, hacen que la ecuación pueda también utilizarse en algunas situaciones de manejo forestal (Portuguez, 2015). Los factores que considera la ecuación EUPS son los siguientes:

Factor R. Erosividad de la lluvia

Corresponde a la erosividad generada por la precipitación media anual, los datos se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas "CLICOM" (Climate Computing Project). Para los dos periodos de estudio se consideraron datos de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en el contexto del área de estudio (Sánchez-Hernández *et al.*, 2013). Para estimar la erosividad de la lluvia (R) se utilizó la ecuación correspondiente a la región VII de la República Mexicana, donde se ubica la zona de estudio (Flores López *et al.*, 2003). El modelo aplicado es el que se presenta a continuación:

$$Y = -0.0334X^2 + 0.006661X^2, \text{ con } R^2 = 0.98$$

Donde:

Y es el valor de EI30 anual en MJ·mm (ha·hr)⁻¹

X es la lluvia anual en mm.

El factor de erosividad (R), se calculó a partir de datos promedios de precipitación anual (pp), esta expresión permitió conocer la erosividad de la lluvia media anual por cada estación climatológica, posteriormente, la información se trabajó en el SIG ArcGIS 10.6, para lo cual se hizo una interpolación de los valores de erosividad, empleando la

herramienta IDW de Spatial Analyst Tools, este método se hizo para cada periodo de estudio 2005 y 2021, y así se obtuvieron los mapas del factor R en formato raster.

Factor K. Erosionabilidad del suelo

El factor de erosionabilidad del suelo (K), se calculó con la información obtenida de las cartas edafológicas con claves: Villa de Allende E14A-36, San Miguel Zinacantepec E14A-37, Valle de Bravo E14A-46, Volcán Nevado de Toluca E14A-47, (Escala: 1/50 000 del INEGI), de las cuales se digitalizaron los diferentes tipos de texturas de los suelos en el SIG ArcGIS 10.6. Posteriormente los polígonos del tipo de textura se cambiaron de formato vector a ráster. El factor K se calculó de acuerdo con el criterio que establece la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 1980) y que consiste en multiplicar los valores numéricos que se presentan en la Tabla 1, asignados a los factores textura y unidad de suelo, según la clasificación de FAO/UNESCO, este factor se estimó una vez para los dos periodos de estudio (Wischmeier & Smith, 1978). El modelo aplicado es el que se presenta a continuación.

Tabla 1. Valores de erosionabilidad (Factor K) para diversas texturas de las unidades de suelo, de acuerdo con la FAO (1980).

Orden	Textura			Orden	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
Acrisoles A	0.026	0.040	0.013	Luvisol Órtico Lo	0.026	0.040	0.013
Acrisol Férrico Af	0.013	0.020	0.007	Luvisol Plíntico Lp	0.053	0.079	0.026
Acrisol Gleico Ag	0.026	0.040	0.013	Luvisol Vértico Lv	0.053	0.079	0.026
Acrisol Húmico Ah	0.013	0.020	0.007	Greyzems M	0.026	0.040	0.013
Acrisol Órtico Ao	0.026	0.040	0.013	Nitosol N	0.013	0.020	0.007
Acrisol Plíntico Ap	0.053	0.079	0.026	Histosol O	0.013	0.020	0.007
Cambisol B	0.026	0.040	0.013	Histosol Éútrico Oe	0.013	0.020	0.007
Cambisol Crómico Bc	0.026	0.040	0.013	Podzol P	0.053	0.079	0.026
Cambisol Distritico Bd	0.026	0.040	0.013	Podzol Férrico Pf	0.053	0.079	0.026

Cambisol Éútrico Be	0.026	0.040	0.013	Podzol Gleico Pg	0.053	0.079	0.026
Cambisol Ferrálico Bf	0.013	0.020	0.007	Podzol Húmico Ph	0.026	0.040	0.013
Cambisol Gleico Bg	0.026	0.040	0.013	Podzol Órtico Po	0.053	0.079	0.026

Fuente: FAO (1980).

Factor LS. Longitud de la pendiente y grado de pendiente del terreno

El cálculo de LS se llevó de forma indirecta a partir de la ecuación de erosión potencial (RKLS) definida en términos de (LS). La erosión potencial se determinó mediante la identificación de los valores obtenidos de los factores trabajados y se elaboró el plano que contempla la multiplicación de los valores numéricos de los factores R, K y LS, que son los generadores del proceso erosivo y su producto es la erosión potencial (ton/ha/año). Por consiguiente, la estimación indirecta del factor de longitud y grado de la pendiente LS se basa en el siguiente análisis, de acuerdo con la SADER:

La estimación del factor de longitud de la pendiente y pendiente media del terreno (LS) se obtuvo de acuerdo con la SADER a partir de un razonamiento matemático; considerando que, para los terrenos altamente erosionables, la tasa de erosión llega a ser ocho veces mayor que la tasa de formación de los suelos; la cual se considera de 20 ton/ha/año como promedio nacional para México, lo que equivale a tener una pérdida de 2 mm de suelo por ha/año. De acuerdo con el concepto de terreno altamente erosionable, como criterio de definición de áreas estratégicas de atención, el factor de pérdida de suelo dentro de la EUPS puede ser sustituido por el valor de 8T (Adame-Martínez *et al.*, 2015), siendo equivalente a tener la igualdad algebraica, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = RKLS + CP = 8T$$

Considerando que el valor de los factores C y P son iguales a la unidad, esto implica tener un terreno desnudo bajo barbecho continuo, y sin prácticas de conservación, con lo que la relación se reduce a:

$$8T = RKLS$$

De la ecuación anterior se calcula el valor de 8T (160 ton/ha/año). Los valores de R (erosividad de la lluvia) y K (Erosionabilidad del suelo) se determinan a detalle dentro de este estudio y son valores conocidos; se despejó a LS y el modelo aplicado fue:

$$LS = 8T / RK$$

De esta manera se obtienen los valores de LS, que varían desde cero en zonas con alto potencial de erosividad de la lluvia y alta erosionabilidad del suelo hasta valores

cercanos a 8, en lugares donde los valores de erosividad son bajos o en casos donde el suelo presenta alta resistencia a la erosión. De aquí que se presenta la existencia de valores mayores y menores de la unidad. Erosión actual y potencial del suelo.

Erosión potencial (EP) y Erosión actual (EA)

De acuerdo con la SADER, para obtener la erosión actual en cada periodo de estudio, se consideró la tasa de formación de los suelos (20 ton/ha/año promedio nacional para México), entre el factor LS (longitud y grado de la pendiente) mediante la herramienta Map Algebra en ArcGIS. Con el valor de L y S, se calculó la tasa de EP y EA mediante las siguientes relaciones algebraicas:

$$EP=8T/LS$$
$$EA=T/LS$$

Donde:

EP = Erosión potencial
EA = Erosión actual

Al implementar esta metodología los valores de L y S proporcionan criterio de definición de las áreas prioritarias de atención, al mismo tiempo es posible realizar una jerarquización de las actividades de conservación en función de la potencialidad productiva del terreno y por el valor económico y social que estas áreas representan. Con base en esto, la estimación del factor LS consistió en sustituir los datos de la ecuación anterior en el SIG ArcGIS. Se usó la herramienta Map Algebra en *Spatial Analyst Tools* para generar los mapas de LS en formato ráster.

RESULTADOS

Los resultados para cada uno de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, se presentan a continuación:

Factor R. Erosividad de la lluvia

Para la estimación del factor de erosividad de la lluvia, Wischmeier y Smith (1978) refieren que los datos de cantidad e intensidad de las precipitaciones son indispensables para estimar la erosión del suelo, ya que corresponde a los riesgos erosivos potenciales de una región en particular (Tribak *et al.*, 2021), y se han desarrollado fórmulas alternativas (debido a la ausencia de datos de las precipitaciones en un área de estudio) que permiten conocer el valor de este factor (Eniyew *et al.*, 2021). Para obtener el factor R, se seleccionaron 19 estaciones climatológicas que se encontraban ubicadas tanto dentro, como en el contexto de la cuenca. Los datos se tomaron de las normales climatológicas; los valores de precipitación son el resultado promedio de 18 años analizados, como se muestran en la Tabla 2 donde se reportan los datos de cada una de las estaciones. (Flores López *et al.*, 2003; Gonzalez del Tanago, 1991; Tseganeh & Arega, 2021).

Tabla 2. Estaciones climatológicas seleccionadas para la obtención del Factor R.

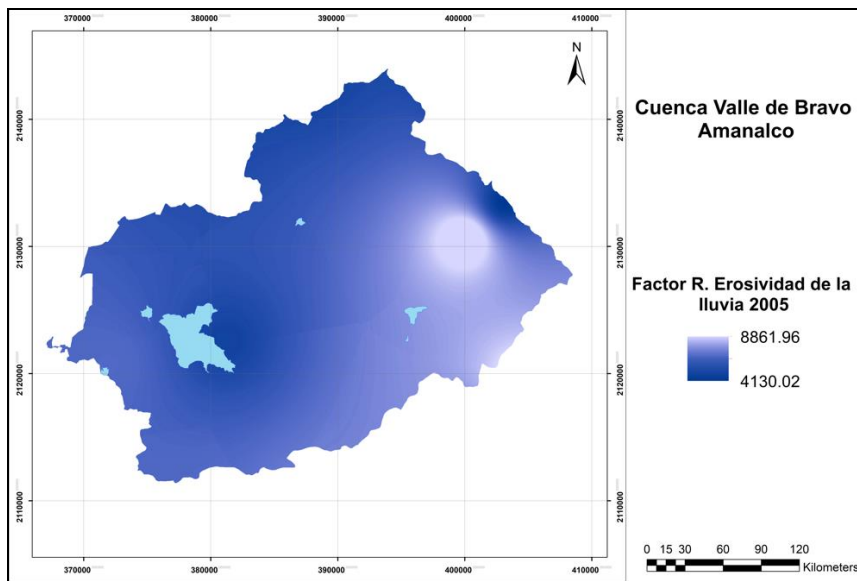
Clave de la Estación	Precipitación Promedio Anual		Valores Factor R	
	2005	2021	2005	2021
15046	949	895	5,965	5,306
15088	1,192	1,192	9,421	9,421
15118	1,019	1,159	6,885	8,902
15140	842	932	4,698	5,751
15160	780	911	4,022	5,491
15165	834		4,603	
15174	790	945	4,130	5,916
15205		876		5,082
15241	935	1,068	5,794	7,559
15265	808	724	4,324	3,468
15276	1,017	1,133	6,855	8,512
15285	1,079	1,022	7,718	6,923
15287	944	1,121	5,899	8,333
15374	1,156	1,136	8,862	8,558
15378	890	841	5,246	4,686
15392		920		5,607
16036	845	956	4,730	6,058
16122	840	966	8,671	6,183
15130		892		5,268

Fuente: Elaboración del autor con base al SMN Y CLICOM (2021).

En la Figura 5 se observa que en el año 2005 la mayor erosividad (mm/ha. año) se presentó en las zonas noreste y suroeste; y muestra mayor intensidad en el municipio de Amanalco de Becerra, donde el efecto de la precipitación pluvial resultó más erosivo.

Las zonas con un potencial de erosividad mayor corresponden a las áreas de mayor altitud y pendientes medias; en estas zonas se encuentran ecosistemas forestales como bosque de oyamel, bosque de pino y agricultura de temporal. Sin embargo, la parte central de la Cuenca es la zona donde la precipitación pluvial resultó ser menos erosiva, en esta zona se ubican las pendientes pronunciadas.

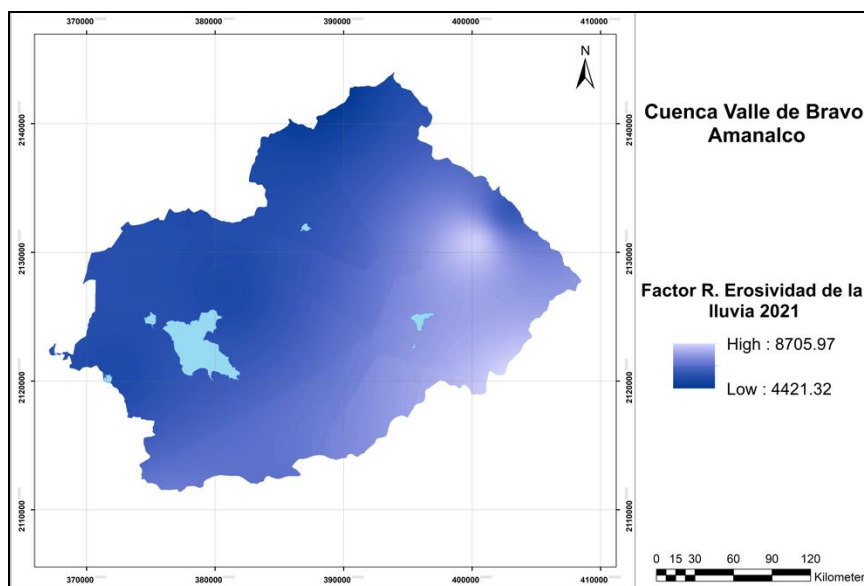
Figura 5. Factor R erosividad de la lluvia (2005).



Fuente: Elaboración del autor.

En la Figura 6 se observa que para el año 2021, la zona noreste donde se ubica el municipio de Amanalco de Becerra muestra la mayor erosividad; aunque para este periodo de estudio en la zona sureste se distribuyó la erosividad hacia el sur; ya que en este año aumentó la intensidad de la lluvia en los municipios de Zinacantepec, Temascaltepec y la zona este de Valle de Bravo. En promedio el efecto de la precipitación pluvial se mantuvo; ya que los valores disminuyeron su intensidad en el municipio de Amanalco de Becerra, pero se distribuyeron hacia el sur, donde se presentan zonas con las mayores altitudes, en esta área se encuentran coberturas forestales, agricultura de temporal y pastizal.

Figura 6. Factor R erosividad de la lluvia (2021).



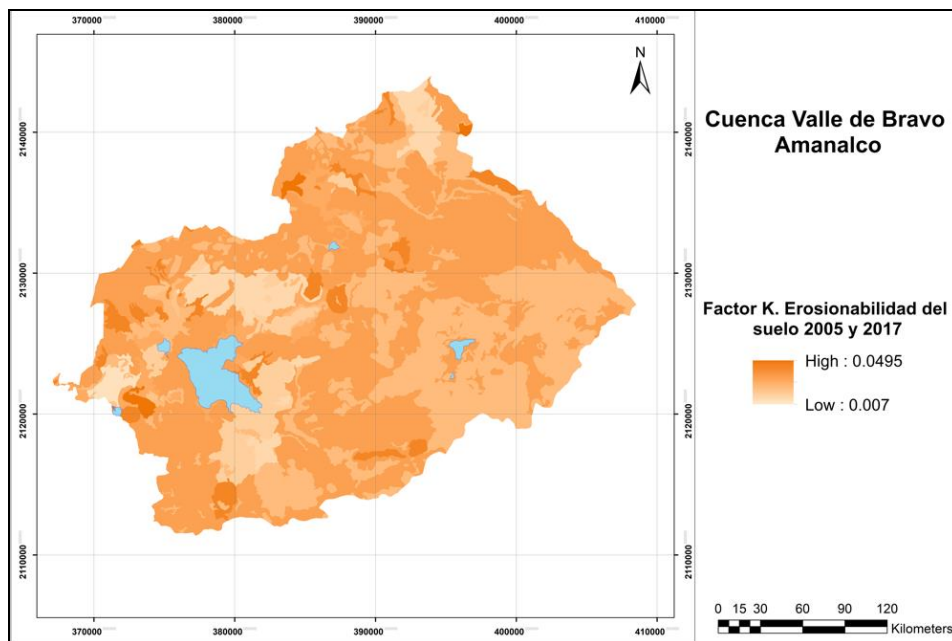
Fuente: Elaboración del autor.

Factor K. Erosionabilidad del suelo

Dentro de las características más influyentes que determinan la erodabilidad del suelo son la textura del suelo, la estructura, la profundidad, la capacidad de drenaje y el nivel de materia orgánica; sin embargo, determinar estos parámetros a partir del mapa de suelos es muy difícil (Eniyew *et al.*, 2021). Por lo tanto, el factor K para este estudio se determinó a partir del método propuesto por FAO (1980) de acuerdo con Figueroa *et al.* (1991), sólo requiere conocer la unidad de suelo y su textura cuando no se disponga de información para hacer uso de nomogramas que permitan determinar este factor, para lo cual se digitalizó cada unidad de suelo del área de estudio a escala 1: 50.000 con un valor de celda de 20 m y se colocó el valor correspondiente a la textura (Flores López *et al.*, 2003; Gonzalez del Tanago, 1991; Portuguez, 2015; Wischmeier & Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991)

La zona de estudio presenta 60 tipos de interacciones en los suelos de las cuales las que predominan son Andosol húmico Th/2 (18.19%), Andosol ócrico + Andosol húmico To+Th/2 (12.12%), Andosol húmico + Cambisol crómico Th+Bc/2 (10.57%), estos tipos de suelo derivan de materiales volcánicos de los cuales resultan buenos para las actividades agrícolas o forestales y resistentes a la erosión hídrica. De acuerdo con la metodología de la FAO, posteriormente se les asignaron los valores respectivos a partir de la textura superficial (fina, media y gruesa) y la unidad de suelo presente. Los valores de K oscilaron entre 0.007 y 0.0495; los valores mínimos indican baja susceptibilidad a la erosión del suelo. Una vez asignados los valores correspondientes del tipo de textura a los polígonos, se cambiaron de formato vector a ráster, con la herramienta poligon to raster de ArcGIS. El resultado fue una imagen raster (Figura 7) que se empleó para los dos periodos de estudio 2005 y 2021.

Figura 7. Factor K, erodabilidad del suelo (2005 y 2021).



Fuente: Elaboración del autor.

Factor LS. Longitud y grado de la pendiente del terreno

De acuerdo con Van Remortel *et al.*, (2001), la generación de los valores LS plantea el mayor desafío en el uso de la USLE (por sus siglas en inglés), ya que el cálculo de este Factor suele ser el más problemático de los parámetros del modelo de erosión (Hickey, 2000). El método tradicional de cálculo ha sido utilizar una estimación regional, convirtiendo así una variable en una constante.

Cuando se utilizan los SIG para evaluar la erosión de los suelos a escala de cuenca, se ha tenido dificultades para obtener el valor del factor topográfico LS, en particular al atender la definición del factor L, por lo que se han hecho esfuerzos para calcularlo con algoritmos de programación, el uso de modelos de elevación digital (MED) (Flores López *et al.*, 2003), así como adaptaciones del Factor L modificando con esto los umbrales de flujo y la resolución del MED (Kaffas, Pisinaras *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). A diferencia de estos estudios, este trabajo presenta una metodología que proporciona, con base a los valores de L y S calculados, un criterio de definición de las áreas prioritarias de atención (Tabla 3), al mismo tiempo es posible realizar una jerarquización de las actividades de conservación en función de la potencialidad productiva del terreno y por el valor económico y social que estas áreas representan (Adame-Martínez *et al.*, 2015).

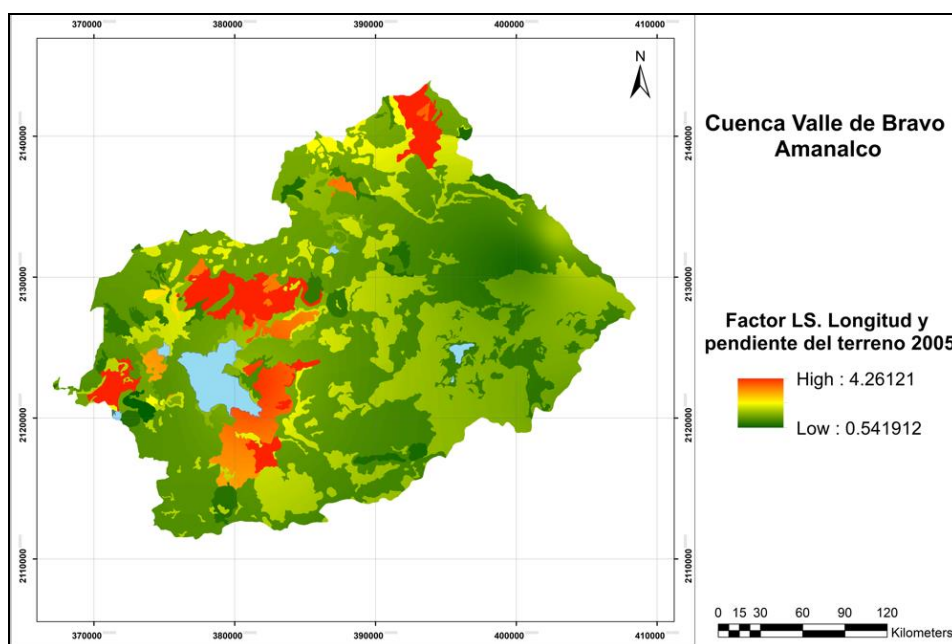
Tabla 3. Valores mayores y menores a la unidad (8T).

Relación	Descripción
Si $LS > 1 \rightarrow 8T > RK$	La erosión provocada por el producto RK es menor del valor considerado como límite para definir terrenos altamente erosionables, por lo que no existen problemas de erosión evidente que requieran atención inmediata, ya que la tasa de formación del suelo es mayor que la tasa de erosión.
Si $LS = 1 \rightarrow 8T = RK$	Este es el punto de equilibrio en la definición de un terreno altamente erosionable, lo que implica que la erosión provocada por el producto RK es equivalente a 160 ton/ha/ año, es decir, que se está perdiendo lo que se forma.
Si $LS < 1 \rightarrow 8T < RK$	La tasa de formación del suelo 8T no es suficiente para sustituir las remociones del suelo, por lo que a estos valores se les debe considerar como áreas prioritarias para el establecimiento de estrategias de conservación.

Fuente: Adame-Martínez *et al.*, (2015).

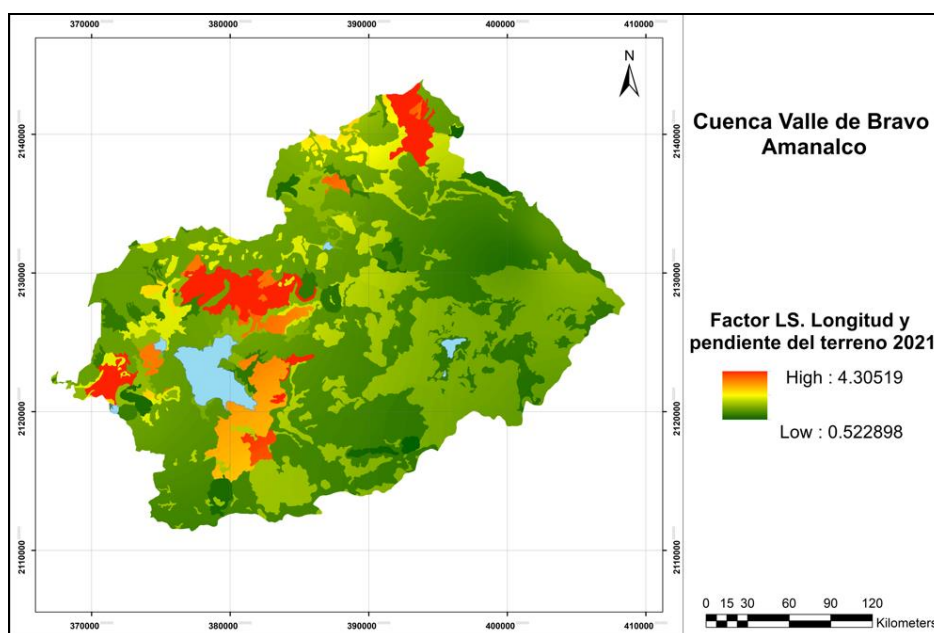
Los datos de longitud y grado de la pendiente del terreno se obtuvieron a partir de la metodología de la SADER, que permitió obtener imágenes ráster para cada periodo de estudio. En las Figuras 8 y 9 se observan las zonas donde el valor del factor LS es más alto en color rojo, se presentan zonas montañosas que rodean la presa de Valle de Bravo, y hacia el norte en terrenos donde se practica la agricultura.

Figura 8. Factor LS Longitud y grado de pendiente (2005).



Fuente: Elaboración del autor.

Figura 9. Factor LS Longitud y grado de la pendiente (2021).



Fuente: Elaboración del autor.

Los resultados obtenidos se compararon con los valores de LS, reportados en la Tabla 3, al oriente de la cuenca se considera que es necesario establecer prácticas de conservación del suelo, ya que los valores son de 0.54 para el año 2005 y de 0.52 para el 2021, y al norte, centro y poniente de la cuenca se obtuvieron valores de 4.26 para el año 2005 y de 4.30 para el año 2021, estas zonas son las que mayor atención requieren,

ya que la tasa de formación de suelo no es suficiente para sustituir las remociones de este.

Erosión potencial y actual: Con base a la clasificación propuesta por la FAO se determinó la clase de erosión potencial y actual. Como se aprecia en la Tabla 4, las pérdidas totales y medias de suelo se expresan en ton/ha/año, en tanto que la lámina de suelo se reporta en mm/año (Adame-Martínez *et al.*, 2015).

Tabla 4. Clases de erosión de suelos de la FAO.

Conceptos	Grados de erosión			
Clases	Ligera	Moderada	Severa	Muy severa
Pérdida (ton/ha/año)	< 10	10-50	50-200	>200
Pérdida media (ton/ha/año)	5	30	125	400
Pérdida (mm/año)	<0.6	0.6-3.3	3.3-13.3	>13.3

Fuente: FAO (1980).

Erosión potencial: El primer rango (0 – 10 ton. ha⁻¹) representa una erosión ligera, para ambos periodos este tipo de erosión se localizan en la zona norte y oeste de la cuenca (Figura 10). El segundo rango (10 – 50 ton. ha⁻¹) representa la erosión moderada, la cual disminuyó en 12.1% al sur y este del área de estudio con respecto al último año analizado. El tercer rango (50 – 200 ton. ha⁻¹) con erosión alta, de acuerdo con el análisis aumenta un 12.5% para el último periodo estudiado (Figura 11).

Para el periodo de estudio 2005 la clase de erosión potencial que predomina en la cuenca es la moderada, con un 86.5% de la superficie total, le sigue la erosión severa con 12.1% y por último la erosión ligera con 1.4% (Tabla 5).

Tabla 5. Clases de erosión potencial en la zona de estudio (2005).

Clase	Área (ha)	Porcentaje
Ligera	967.2	1.4
Moderada	61,047.76	86.5
Severa	8,552.76	12.1
Total	70,567.72	100

Fuente: Elaboración del autor.

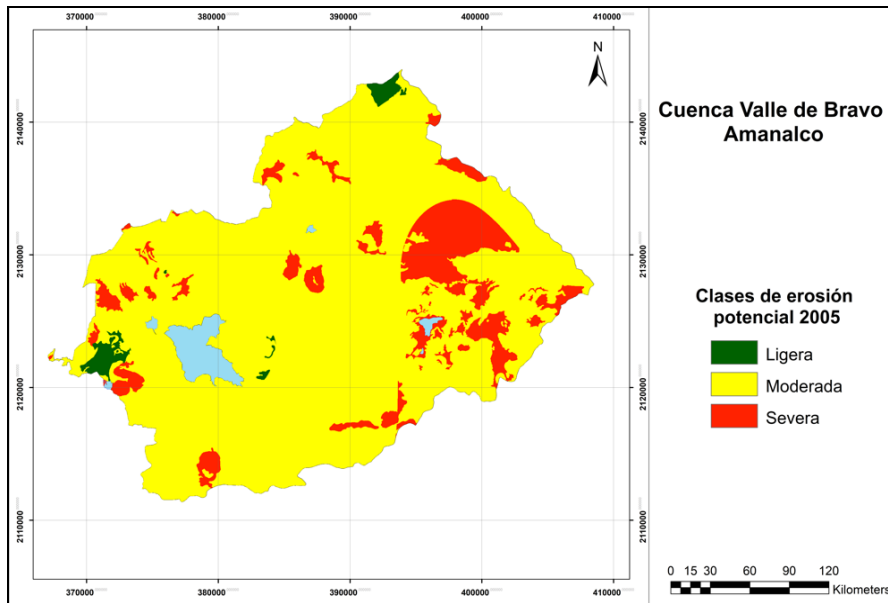
Para el periodo de estudio 2021 la clase de erosión potencial que predomina en la cuenca es la moderada, con un 74.5% de la superficie total, le sigue la erosión severa con 24.6% y por último la erosión ligera con 0.9% (Tabla 6).

Tabla 6. Clases de erosión potencial en la zona de estudio (2021).

Clase	Área (ha)	Porcentaje
Ligera	657.4	0.9
Moderada	52,568.64	74.5
Severa	17,341.68	24.6
Total	70,567.72	100

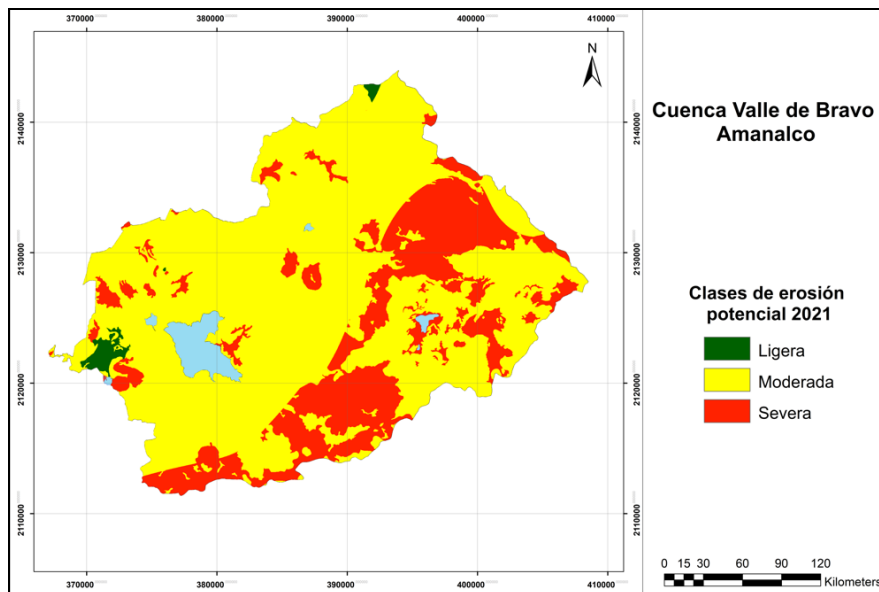
Fuente: Elaboración del autor.

Figura 10. Erosión potencial (2005).



Fuente: Elaboración del autor.

Figura 11. Erosión potencial (2021).



Fuente: Elaboración del autor.

El primer rango (0 – 10 ton. ha-1) representa una erosión ligera, para ambos periodos este tipo de erosión se localizan en la zona este y noreste de la presa Valle de Bravo y al norte de la cuenca (Figura 12). El segundo rango (10 – 50 ton. ha-1) representa la erosión moderada, la cual aumentó en 1.5% al sur de la presa Valle de Bravo (Figura 13). El tercer rango (50 – 200 ton. ha-1) con erosión alta, de acuerdo con el análisis no se presenta en la zona de estudio en ninguno de los dos periodos.

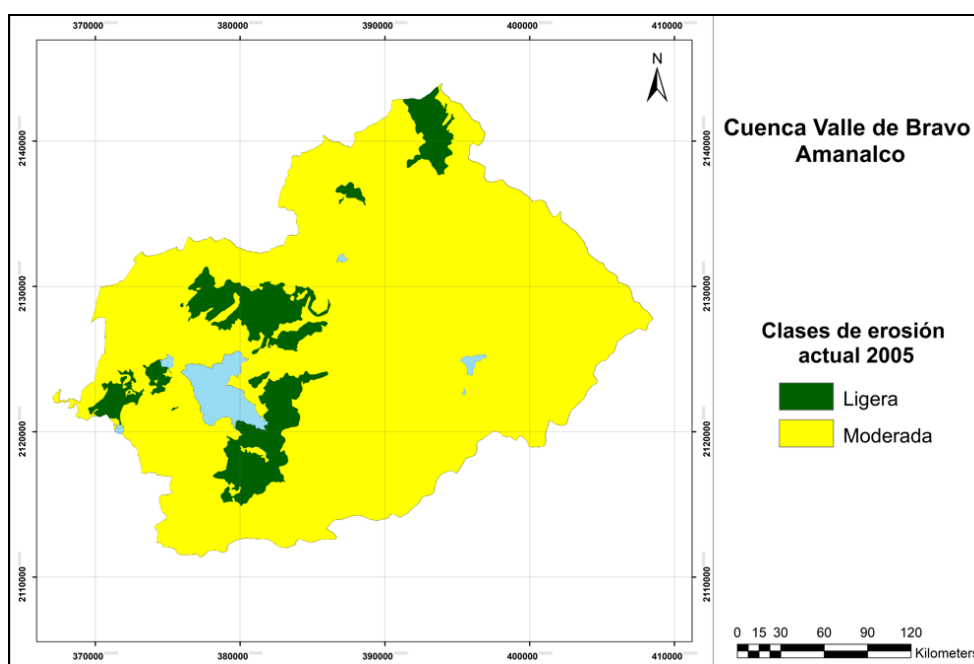
Para el periodo de estudio 2005 la clase de erosión actual que predomina en la cuenca es la moderada, con un 89.5% de la superficie total y le sigue la erosión ligera con un 10.5% (Tabla 7).

Tabla 7. Clases de erosión actual en la zona de estudio (2005)

Clase	Área (ha)	Porcentaje (%)
Ligera	7,391.64	10.5
Moderada	63,176.08	89.5
Total	70,567.72	100

Fuente: Elaboración del autor.

Figura 12. Erosión actual (2005).



Fuente: Elaboración del autor.

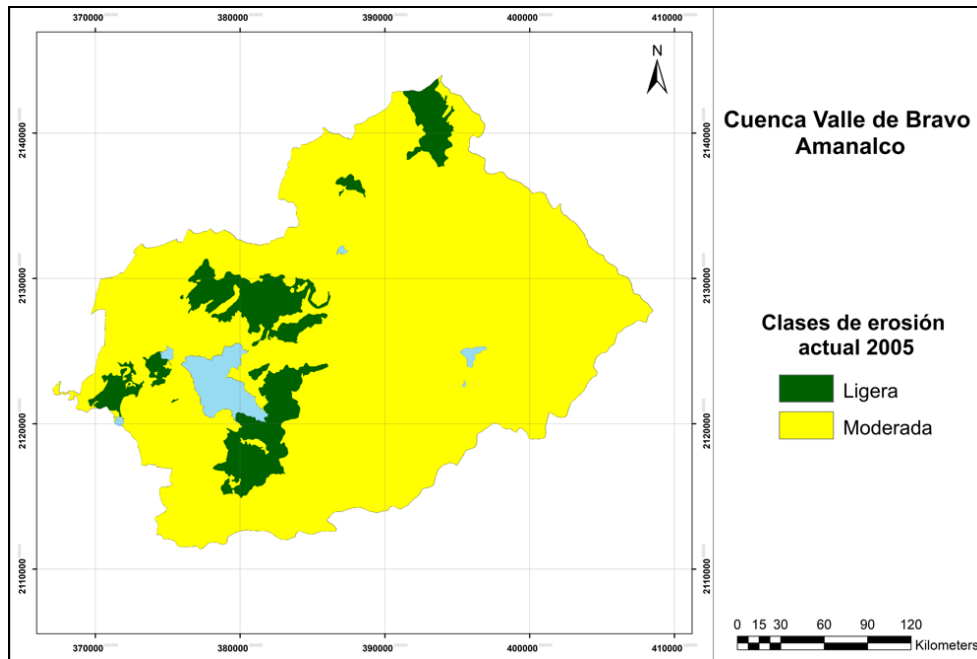
Para el periodo de estudio 2021 la clase de erosión actual que predomina en la cuenca es la moderada, con un 91% de la superficie total y le sigue la erosión ligera con un 9% (Tabla 8).

Tabla 8. Clases de erosión actual en la zona de estudio (2021).

Clase	Área (ha)	Porcentaje (%)
Ligera	6,350.08	9
Moderada	64,217.64	91
Total	70,567.72	100

Fuente: Elaboración del autor.

Figura 13. Erosión actual (2021).



Fuente: Elaboración del autor.

La erosión moderada se manifiesta en los alrededores de la Presa Valle de Bravo, principalmente en las laderas suroeste que drenan hacia el vaso de esta. La causa principal de este proceso es la deforestación y el desarrollo acelerado de los asentamientos humanos en esa área. Debido a que los suelos le dan cierta estabilidad, la erosión es de tipo laminar que ha originado la pérdida del horizonte superficial, dejando al descubierto el horizonte subsuperficial rojizo, de manera que han estado aportando sedimentos finos y materia orgánica a la Presa Valle de Bravo. De no frenarse este problema, se acelerará el azolvamiento del embalse. Esto se confirma con la (Secretaría de Ecología, 2003a, 2003b), donde señala que la erosión ligera se manifiesta en las regiones norte y suroeste de la Cuenca, debido a la deforestación y al cambio del uso del suelo.

Por otro lado, en recorridos de campo de diversas zonas se pudo observar deforestación de zonas arboladas para ampliar la frontera agrícola y para producción de madera. Igualmente se identificaron zonas con prácticas inadecuadas de cultivos agrícolas, se destaca la inexistencia de líneas de estabilización de laderas, la falta de protección contra la erosión en las zonas de agricultura de temporal, la actitud convencional

orientada al monocultivo de maíz y la consecuente ausencia de rotación de cultivos (Figura 14). Asimismo, se destaca la práctica del uso indiscriminado de agroquímicos, sin estudios previos que definan las cantidades requeridas, según la condición de los suelos y el tipo de cultivo. Por lo anterior, para estas zonas erosionadas se requiere atención con la finalidad de establecer programas para su control y recuperación, por medio de estrategias de conservación de suelos (Adame-Martínez *et al.*, 2015; Secretaría de Ecología, 2003b). Si bien, es difícil comparar métodos y resultados tan variados que dificultan su comparación, al menos, han servido para poner de manifiesto la existencia del riesgo de erosión y establecer con esto, valores y causas de referencia (Tribak *et al.*, 2021)

Figura 14. Arraste de sedimentos en un área agrícola de la cuenca.



Fuente: Fotografía de los autores.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, este trabajo aporta una metodología útil para determinar el grado de erosión del suelo de una forma rápida y confiable, que de acuerdo con Tribak *et al.*, (2021), para territorios relativamente extensos, con difícil acceso y carentes de otras fuentes de información, la EUPS se muestra como el más eficaz en sus resultados pues reduce el número de datos secundarios que requiere y su tratamiento mediante SIG, según Flores López *et al.*, 2003 también ha sido el método más utilizado para diseñar planes de manejo acorde a las condiciones propias de cada lugar (Pando Moreno *et al.*, 2003; Portuguez, 2015).

Al comparar los dos periodos analizados se concluye que no se observan cambios significativos entre el año 2005 y el 2021; pero es relevante que la erosión actual es moderada en casi la totalidad de la zona de estudio, lo que refleja la importancia de que la Cuenca requiere atención en materia de conservación del suelo y agua; ya que los niveles de agua de las presas han disminuido significativamente y han tenido pérdidas en su capacidad. En la actualidad de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua el promedio de captación de los tres principales embalses es del 46.2%, de las cuales la presa principal de Valle de Bravo se encuentra en un 58% de su capacidad.

El uso de los sistemas de información geográfica en esta investigación representó una herramienta importante para el análisis, representación y evaluación de los cambios por

erosión hídrica, ya que permitió identificar las áreas más susceptibles y ayudó a comprender mejor los procesos de cambio en el área de estudio. Para esta investigación, la adecuación de los polígonos con base en la interpretación visual de las imágenes de satélite permitió minimizar los errores cartográficos que se producen durante el proceso de clasificación obteniendo con ello mayor confiabilidad en los mapas. El combinar la EUPS y el método de la SADER, permitió simplificar la metodología desarrollada por la FAO y obtener los mapas para cada periodo de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

Adame-Martínez, S., Campos-Medina, E., & García-Camacho, A. (2015). Cálculo de la erosión hídrica en la Zona Central de México. Caso de estudio, Cuenca del Río Tenancingo. In M. E. Orozco-Hernández, D. Velázquez-Torres, B. L. Campos-Cámara, & J. Tapia-Quevedo (Eds.), *Paradigmas del desarrollo social y territorial* (Primera, 2, pp. 183–200). México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Bhuyan, S. J.; Kalita, P. K.; Janssen, K. A.; Barnes, P. L. (2002). Soil loss predictions with three erosion simulation models. *Environmental Modelling and Software*, 17(2), 135–144. [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(01\)00046-9](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00046-9)

Bonfil, H.; Madrid, L. (2006). El pago por servicios ambientales en la Cuenca de Amanalco-Valle de Bravo. *Gaceta Ecológica*, 80, 63–74. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/539/53908005.pdf>

Bueno-Hurtado, P.; Velásquez-Valle, M. A.; López-Santos, A.; Sánchez-Cohen, I.; González-Barrios, J. L. (2016). Implementación de un modelo para estimar la erosión hídrica con parámetros distribuidos aplicados a cuencas. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XV(1), 47–54. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2015.08.012>

Elnashar, A.; Zeng, H.; Wu, B.; Fenta, A. A.; Nabil, M.; Duerler, R. (2021). Soil erosion assessment in the Blue Nile Basin driven by a novel RUSLE-GEE framework. *Science of the Total Environment*, 793, 148466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148466>

Eniyew, S.; Teshome, M.; Sisay, E.; Bezabih, T. (2021). Integrating RUSLE model with remote sensing and GIS for evaluation soil erosion in Telkwonz Watershed, Northwestern Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24(August), 100623. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100623>

FAO. (1980). *Metodología provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. Roma, Italia.

Figuroa S. B.; Amante, O.; Cortés, T. J.; Pimentel, L., Osuna, C.; Rodríguez, O.; Morales, F. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Posgraduados. Salinas, San Luis Potosí, México.

Flores López, H. E.; Martínez Menes, M.; Oropeza Mota, J. L.; Mejía Saens, E.; Carrillo González, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una Cuenca Hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 233–244.

Gonzalez del Tanago, M. (1991). La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología (Madrid)*, (5), 13–50.

Hickey, R. (2000). Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography*, 29(1), 1–8. <https://doi.org/10.1080/00690805.2000.9714334>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2012). Plan estratégico para la recuperación ambiental de la Cuenca Amanalco-Valle de Bravo: Actualización. MÉXICO. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1538>

Kaffas, K.; Pisinaras, V.; Al Sayah, M. J.; Santopietro, S.; Righetti, M. (2021). A USLE-based model with modified LS-factor combined with sediment delivery module for Alpine basins. *Catena*, 207(July), 105655. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105655>

Lovera Pons, V.; Roldán Aragón, I. E.; Sánchez Robles, J.; Torres Lima, P. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de rendimiento hídrico entre los años de 1994 y 2016 en el municipio de Valle de Bravo, estado de México. *Papeles de Geografía*, 0(64), 93–113.

Nájera González, O.; Bojórquez Serrano, J. I.; Flores Vilchez, F.; Murray Núñez, R. M.; González García-Sancho, A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 45–55. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3942.5527>

Pando Moreno, M.; Gutiérrez Gutiérrez, M.; Maldonado Hernández, A.; Palacio Prieto, J. L.; Estrada Castellón, A. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas*, 51(821), 23–36.

Portuguez, D. M. (2015). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la Cuenca del Río Sigüas utilizando Geoinformática. *Anales Científicos*, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>

Sánchez-Hernández, R.; De Dios Mendoza-Palacios, J.; De la Cruz Reyes, J. C.; Mendoza Martínez, J. E.; Ramos-Reyes, R. (2013). Mapa de Erosión potencial en la cuenca baja Grijalva-Usumacinta mediante el uso de SIG. *Universidad y Ciencia*, 29(2), 153–161. Retrieved from www.universidadyciencia.ujat.mx

Secretaría de Ecología (2003a). Ordenamiento Ecológico Cuenca Valle De Bravo-Amanalco Modelo De Ordenamiento Ecológico. Gobierno Del Estado.

Secretaría de Ecología (2003b). Programa de Ordenamiento Ecológico Regional de la Subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco. *Gaceta Del Gobierno*, p. 124.

Sierra López, N.; Zizumbo Villarreal, L.; Romero Contreras, T.; Monterroso Salvatierra, N. (2011). Ordenamiento territorial, turismo y ambiente en Valle de Bravo, México. Cuadernos Geograficos, 5462(48), 233–250. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v48i0.587>

Tribak, A.; Baena-Escudero, R.; Guerrero-Amador, I. C.; Amhani, Z.; Abahrour, M.; El Garouani, A.; Arari, K. (2021). Evaluación de los usos del suelo y la erosión hídrica en la subcuenca hidrográfica montañosa del Oued Ourtza (Pre-Rif Oriental, Marruecos). Investigaciones Geograficas, 2021(76), 309–326. <https://doi.org/10.14198/INGEO.18851>

Tseganeh, G.; Arega, M. (2021). Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia. Environmental Challenges, 4(February), 100174. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100174>

Van Remortel, R. D.; Hamilton, M. E.; Hickey, R. J. (2001). Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within arclinfo grid. Cartography, 30(1), 27–35. <https://doi.org/10.1080/00690805.2001.9714133>

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. In U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook (USDA/Scien). Washington, D.C. 20402: U.S. Department of Agriculture.

Wang, C.; Shan, L.; Liu, X.; Yang, Q.; Cruse, R. M.; Liu, B.; Pang, G. (2020). Impacts of horizontal resolution and downscaling on the USLE LS factor for different terrains. International Soil and Water Conservation Research, 8(4), 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.08.001>

© Jocksan Edrey Reyes Andrade, Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo, Salvador Adame Martínez.

Reyes, J.; Gutiérrez, J.; Adame, S. (2022). Evaluación de la erosión hídrica en la zona centro de México, Cuenca Valle de Bravo - Amanalco. **Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)**. 14(24)Sección I:1-22

On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig

Recibido: 16 de julio de 2022

Aceptado: 5 de octubre de 2022