DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363
Publicación Semestral Pädi Vol. 12 Núm. Especial 3 (2024) 32-42

La cuenca Río Grande Tulancingo: Erosión hídrica y vulnerabilidad
Río Grande Tulancingo basin: Hydric erosion and vulnerability

Ezra G. Méndez-Morales [a], María R. González-Sandoval [b], Humberto I. Navarro-Gómez [b,*]
Christopher Contreras-López [b], Jesús E. Cerón-Carballo [b]

[a] *Licenciatura en Geología Ambiental, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

La Cuenca del Río Grande de Tulancingo localizada en el estado de Hidalgo, México, enfrenta presiones significativas debido al crecimiento demográfico, la urbanización, la agricultura intensiva, la actividad industrial y el cambio climático. Estos factores aumentan la vulnerabilidad de la cuenca al deteriorar la calidad del agua superficial y afectar la disponibilidad de recursos hídricos. Este estudio empleó el método de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (RUSLE, por sus siglas en inglés) para evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica y técnicas de SIG para analizar cambios en el uso del suelo. Los resultados mostraron altos niveles de erosión en puntos cercanos a las zonas urbanas, esto debido a prácticas agrícolas presentes en toda la zona de la cuenca, así como una significativa pérdida de suelo en áreas con mayor pendiente y menor cobertura vegetal. Se proponen medidas de gestión sostenible para mitigar estos impactos.

Palabras Clave: Método RUSLE, vulnerabilidad, contaminación, agua superficial, gestión sustentable.

Abstract

The Río Grande de Tulancingo Basin, located in the state of Hidalgo, Mexico, is under significant pressure from population growth, urbanization, intensive agriculture, industrial activities, and climate change. These factors exacerbate the basin's vulnerability by degrading surface water quality and diminishing the availability of water resources. This study employed the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) method to assess soil loss due to water erosion, complemented by Geographic Information System (GIS) techniques to analyze land use changes. The findings indicate high levels of erosion, particularly in areas adjacent to urban centers, driven by both agricultural practices all over the basin, including steep slopes and sparse vegetation cover. To mitigate these impacts, the study proposes sustainable management strategies.

Keywords: RUSLE method, vulnerability, contamination, surface water, sustainable management.

1. Introducción

El agua es un componente fundamental de los ecosistemas naturales y desempeña un papel crucial en la regulación del clima, la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres. La contaminación del agua puede tener efectos devastadores en los ecosistemas, incluyendo la pérdida de biodiversidad, la degradación de los hábitats acuáticos y la alteración de los ciclos biogeoquímicos (ONU, 2020). A nivel mundial, muchas regiones enfrentan retos relacionados con la disponibilidad de agua, incluyendo la escasez de agua dulce y la sobreexplotación de los recursos hídricos.

El aumento en la temperatura global y los cambios en los patrones de precipitación están intensificando las sequías, lo que reduce la disponibilidad de agua superficial y subterránea afectando tanto a la agricultura como al abastecimiento de agua potable. Por otro lado, las lluvias torrenciales cada vez más comunes no solo incrementan el riesgo de inundaciones, también aumentan la erosión del suelo y la sedimentación en cuerpos de agua, deteriorando aún más la calidad del agua disponible.

Es por ello que se requiere realizar estudios integrales de las regiones afectadas por estos fenómenos. Considerando lo anterior, es importante analizar, de manera dinámica, los aspectos técnicos relacionados con la cuenca y su interacción con el acuífero subyacente, destacando las afectaciones antropogénicas que se presentan en el área de estudio. Entre los aspectos técnicos a considerar se deben incluir:

*Autor para la correspondencia: Humberto_navarro@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: ezragaelmm@gmail.com (Ezra Gael Méndez-Morales), mrgonzalez@uaeh.edu.mx (María del Refugio González-Sandoval), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Iván Navarro-Gómez), christophercl@gmail.com (Christopher Contreras-López), jesus_ceronc@uaeh.edu.mx (Jesús Emmanuel Cerón-Carballo).

Historial del manuscrito: recibido el 12/07/2024, última versión-revisada recibida el 17/08/2024, aceptado el 30/08/2024 publicado el 14/11/2024. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13439

A) Hidrología superficial: Análisis de la dinámica del flujo de agua en la cuenca, incluyendo caudales, patrones de escorrentía, y áreas de recarga.
B) Geomorfología y topografía: Estudio del relieve y la pendiente del terreno, que influye en la erosión, la escorrentía y la infiltración de agua.
C) Composición del suelo: Evaluación de la permeabilidad y capacidad de retención de agua de los diferentes tipos de suelo presentes en la cuenca.
D) Interacción cuenca-acuífero: Análisis de los procesos de infiltración y recarga del acuífero, así como la descarga de agua subterránea hacia los cuerpos de agua superficiales.
E) Calidad del agua: Monitoreo de la contaminación y la calidad del agua tanto superficial como subterránea, incluyendo la presencia de contaminantes químicos y biológicos.
F) Uso del suelo y cobertura vegetal: Evaluación del impacto del uso del suelo, como la urbanización y la agricultura, en la capacidad de la cuenca para infiltrar y retener agua.
G) Erosión y sedimentación: Análisis de la pérdida de suelo por erosión y su transporte hacia cuerpos de agua, afectando tanto la calidad del agua como la capacidad de almacenamiento del acuífero.
H) Factores antropogénicos: Estudio del impacto de las actividades humanas, como la agricultura intensiva, la urbanización y la industria, en la disponibilidad y calidad del agua.

En este contexto, el estudio de la vulnerabilidad de la cuenca superficial del Valle de Tulancingo, localizada en el Estado de Hidalgo, México, es de vital importancia para comprender y gestionar de manera más eficiente al recurso hídrico ya que en las últimas décadas, ha sufrido degradación ambiental debido a prácticas insostenibles y a la falta de una gestión efectiva y realmente integral del recurso hídrico. Los aspectos técnicos son fundamentales para entender cómo se comporta la cuenca superficial del Valle de Tulancingo en relación con el acuífero subyacente y para desarrollar estrategias de manejo que aseguren la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región.

Históricamente, la cuenca del Río Grande de Tulancingo ha sido un pilar para el desarrollo económico de la región, siendo una fuente vital de agua para diversas comunidades y actividades económicas. Esta cuenca abastece de agua potable a más de 150,000 personas que residen en el Valle de Tulancingo y en sus alrededores. Asimismo, es esencial para el desarrollo de actividades productivas clave, como la agricultura, la ganadería y la industria, que dependen en gran medida de este recurso para su operación diaria.

La agricultura intensiva en la región, que incluye el cultivo de maíz, frijol y hortalizas, es especialmente vulnerable al desabasto de agua, lo que podría afectar no solo la economía local sino también la seguridad alimentaria. De igual manera, las industrias que operan en el valle, incluyendo fábricas de alimentos y manufacturas, dependen del agua de la cuenca para sus procesos de producción. La ganadería, otro sector importante, también está en riesgo, ya que el agua es crucial para el sustento de los animales y la producción de productos lácteos y cárnicos.

La explotación excesiva de los recursos hídricos y la contaminación derivada de actividades agrícolas e industriales han incrementado la vulnerabilidad de la cuenca, especialmente frente a fenómenos extremos, como sequías prolongadas y precipitaciones intensas.

Este estudio se justifica en la necesidad de entender estas dinámicas y proponer medidas que aseguren la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región, minimizando los impactos adversos de los eventos extremos en un contexto de cambio climático. Para ello se toma como punto de partida la valoración de la erosión hídrica de la cuenca, asociada a los diferentes usos de suelo y su posible interacción con el acuífero.

1.1. Estado del arte

Las investigaciones encontradas hasta ahora sobre la cuenca del Río Grande de Tulancingo han identificado impactos críticos en su hidrología debido al cambio de uso de suelo y a la contaminación (Torres-Juárez, et al., 2024); se han realizado análisis de riesgos hidrológicos de la presa La Esperanza, ubicada en la cuenca al sureste de la ciudad de Tulancingo y cuya vida útil se encuentra superada y presenta asolvamiento importante (Herrera *et al.,* 2018).

Se sabe también que el acuífero del Valle de Tulancingo es uno de los más sobreexplotados del país, con un déficit anual superior a los 20 millones de metros cúbicos; Cruz-Sánchez y colaboradores (2020) analizaron diversas fuentes de agua como pozos y manantiales de la zona encontrando que, de acuerdo con el índice de calidad del agua, esta era de buena a excelente; sin embargo, la presencia anómala de nitratos, cloruros y fosfatos indica una posible afectación antropogénica.

Herrera y colaboradores (2018) determinaron, mediante análisis de la información meteorológica y los registros de inundaciones de la ciudad de Tulancingo, que existe un incremento de probabilidad de que se presente un evento extremo en los meses de Agosto, Septiembre y Octubre (ASO). Aunado a lo anterior, se produce un incremento en la humedad del suelo en el periodo ASO, lo que conlleva a la presencia de suelos saturados, por ende, mayor tendencia para encharcamientos e inundaciones.

Herrera y colaboradores (2018) también indicaron que la vulnerabilidad en la región se ha incrementado considerablemente debido a múltiples factores interrelacionados. En primer lugar, el crecimiento de la población en zonas de alto riesgo ha aumentado la exposición a eventos extremos, como inundaciones y deslizamientos de tierra, lo que pone en peligro la vida y los bienes de un número creciente de personas.

Además, la infraestructura crítica como la presa La Esperanza, ha superado su tiempo de vida útil, lo que disminuye su capacidad para manejar adecuadamente el flujo de agua durante episodios de lluvias intensas, incrementando el riesgo de fallas estructurales que podrían tener consecuencias catastróficas.

Otro factor que agrava esta situación es la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales. La ausencia de sistemas eficaces de tratamiento no solo contamina los recursos hídricos, sino que también contribuye a la degradación de los ecosistemas acuáticos, afectando aún más la resiliencia de la región frente a eventos extremos.

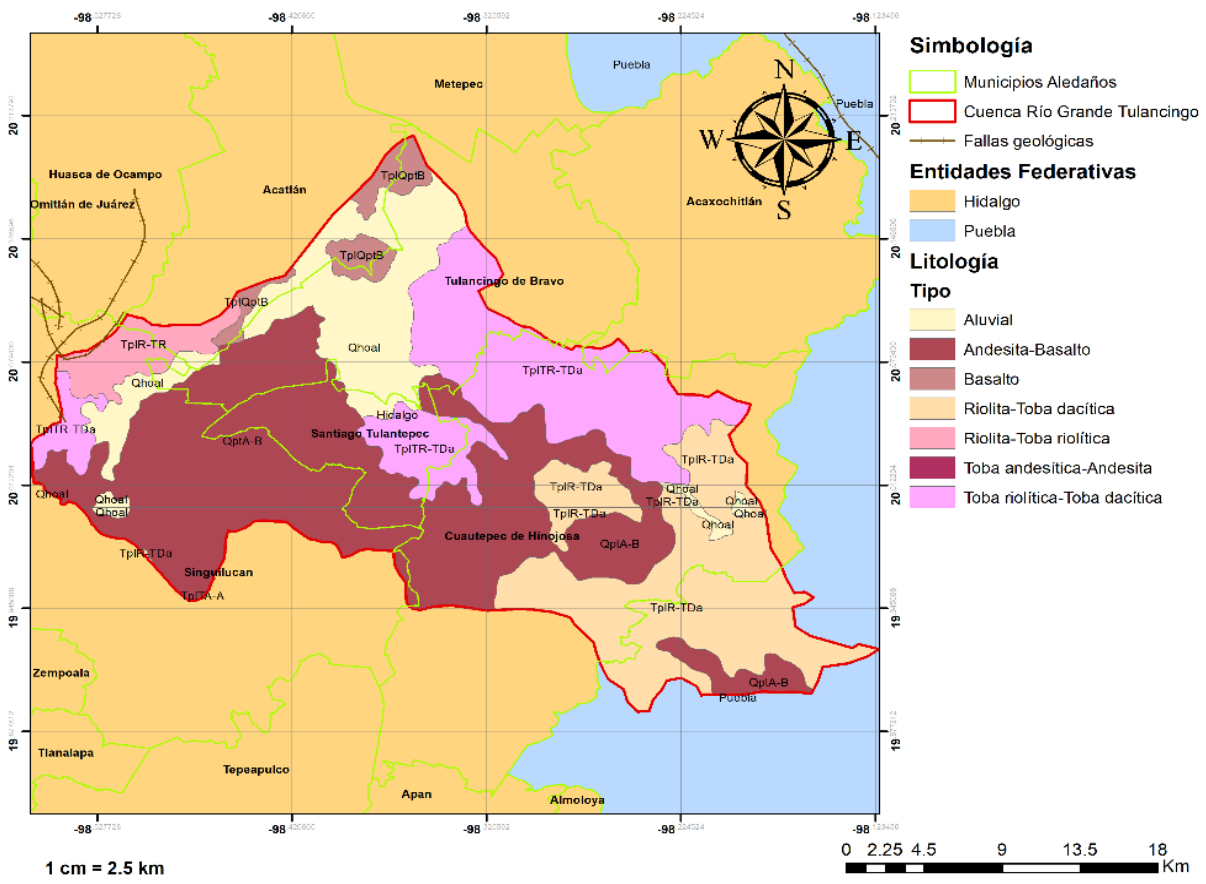

Figura 1: Litología de la Cuenca Río Grande Tulancingo.

En este contexto, surge la necesidad imperiosa de implementar estrategias integradas de gestión del agua y políticas estrictas de control de la contaminación. Estas estrategias deben abordar no solo la mitigación de riesgos, sino también la adaptación al cambio climático, mediante la protección y recuperación de infraestructuras clave y la regulación del crecimiento urbano en zonas vulnerables.

Sin embargo, existe una carencia notable de investigaciones que integren análisis avanzados de vulnerabilidad con enfoques de gestión adaptativa. Estudios recientes, como los de Pérez-Molina et al. (2021), han destacado la importancia de incorporar herramientas de modelado y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para realizar una evaluación más precisa de las zonas críticas y del comportamiento del agua bajo escenarios de cambio climático. Esta integración de tecnologías avanzadas es crucial para desarrollar soluciones más efectivas que puedan responder a los desafíos crecientes que enfrenta la región.

De hecho, en diversas partes del mundo se han realizado estudios de caso utilizando metodologías que incluyen teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para analizar cambios en el uso del suelo, modelos hidrológicos como SWAT y MIKE SHE, análisis de vulnerabilidad como SINTACS, y métodos de evaluación de vulnerabilidad como DRASTIC y GOD. Estos estudios concluyen que la deforestación y la expansión agrícola son factores clave de degradación que exacerban la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas, una situación que también se refleja en la cuenca del Río Grande de Tulancingo (Arias et al., 2023; Barragán et al., 2018; Ganasri et al., 2015).

Esto subraya la necesidad urgente de aplicar enfoques similares en la región para comprender mejor las dinámicas de degradación y desarrollar estrategias de gestión más robustas y sostenibles.

1.2. Descripción de la zona de estudio

Hidrología

La cuenca de Río Grande Tulancingo se ubica en la Región Hidrológica RH 26 “Río Pánuco”, Subregión Hidrológica Alto Pánuco del Río Moctezuma, perteneciente al Organismo de Cuenca Golfo Norte (DOF, 2024). La corriente principal recibe el nombre de Río Grande Tulancingo, el cual cambia su nombre aguas abajo por Río Alcholoya y posteriormente a Río Metztitlán. Se origina al sur del valle, al pie del Cerro Tlachaloya, localizado al sureste de la zona de estudio, a partir de la confluencia de los ríos Chico y San Lorenzo. El agua de esta corriente se utiliza para riego mediante canales paralelos al río. La geomorfología de la cuenca está caracterizada por un valle bordeado por sierras, con varios tipos de relieve que incluyen sierras volcánicas y mesetas.

Geología

La cuenca presenta una combinación de rocas volcánicas del Paleógeno y Cuaternario, sedimentarias del Cretácico y sedimentos aluviales. Las rocas volcánicas más antiguas que conforman las sierras del oriente y poniente, respectivamente, están constituidas por derrames lávicos, tobas y brechas de

tipo riolítico, así como lavas dacíticas y derrames de riolita masiva del Mioceno-Oligoceno. En el subsuelo del valle se encuentran capas de pómez, cenizas, material piroclástico poco consolidado de textura gruesa que incluyen fragmentos de obsidiana e intercalaciones de lavas basálticas con un espesor aproximado de 100 m.

Los materiales volcánicos del Cuaternario que descansan sobre las formaciones anteriores están representados por basaltos y cenizas volcánicas, derrames basálticos que forman las sierras del sur y noreste, y basaltos y cenizas que afloran en la porción norte y noroeste. Los materiales sedimentarios aluviales del Cuaternario que rellenan la fosa tectónica del Valle de Tulancingo incluyen clásticos, arcillosos, arenosos y conglomeráticos y aluviones que presentan un reducido espesor (Figura 1). Los materiales aluviales cubren a una colada de basaltos de alrededor de 50 m de espesor.

Edafología

Las características de los suelos de la cuenca afectan la retención de agua y la fertilidad. Algunos de los tipos de suelo comunes en esta área son los siguientes:

- Suelos aluviales: Estos suelos se encuentran a lo largo de los ríos y arroyos en la cuenca del valle. Son generalmente fértiles y tienen una alta capacidad de retención de agua debido a su alto contenido de materia orgánica.
- Suelos vertisoles: Son suelos arcillosos con una alta capacidad de expansión y contracción en respuesta a la humedad. Son comunes en áreas con inundaciones estacionales.
- Suelos regosoles: Son suelos poco desarrollados que se encuentran en áreas con erosión activa y una cobertura vegetal escasa. Tienen una textura variable y pueden ser pobres en nutrientes.
- Suelos luvisoles: Son suelos con un horizonte superficial oscuro y rico en materia orgánica, sobre un horizonte subsuperficial más claro y menos desarrollado. Son comunes en áreas de bosques y tierras de cultivo.
- Suelos feozem: Son suelos bien drenados y fértiles que se encuentran en áreas con una vegetación natural de pastizales y matorrales. Tienen una textura variable y son aptos para la agricultura.

Actividad económica y consumo de agua

El valle de Tulancingo tiene una gran importancia desde el punto de vista de la actividad agrícola y por ende presenta el mayor número de aprovechamientos hidráulicos con más de 300 pozos de agua. También en esta zona, se encuentra ubicada la acumulación de agua más importante de manera superficial, las represas en las zonas de riego; son de gran importancia en la actividad agrícola y pecuaria de la zona y apoyan la creación de forrajeras de esta cuenca lechera. La mayoría de los cultivos son de forraje para la manutención del ganado bovino para leche y de algunos ovinos para lana y barbacoa (SGM, 2024).

Zonas de Recarga y Afloramientos de Aguas Superficiales

Las zonas de recarga se localizan principalmente en las partes altas de la cuenca, donde la infiltración de agua de lluvia es más significativa. Estas áreas son cruciales para el mantenimiento del acuífero, ya que permiten la entrada de agua a las formaciones subterráneas. Sin embargo, también son vulnerables a la contaminación por escorrentía de áreas urbanizadas y agrícolas. Los principales afloramientos de aguas superficiales se encuentran a lo largo del río Grande de Tulancingo y sus tributarios, donde el acuífero descarga agua hacia la superficie, especialmente en las zonas de menor elevación del valle. Las zonas de recarga en la cuenca corresponden a varios tipos de suelos y formaciones geológicas que favorecen la infiltración de agua. Es común encontrar depósitos de arena, grava y arcillas que, debido a su alta permeabilidad, son ideales para la recarga del acuífero.

La permeabilidad es un factor clave que influye directamente en la eficacia de estas zonas de recarga. Se refiere a la capacidad de un material para permitir el flujo de agua a través de él. En las zonas de recarga de la cuenca del Río Grande de Tulancingo, los suelos y materiales que las componen, como arenas, gravas y arcillas, determinan la capacidad de infiltración del agua de lluvia hacia el acuífero.

La alta permeabilidad de materiales como las arenas y gravas facilita un flujo rápido de agua, lo que puede favorecer la recarga del acuífero (Figura 2). En contraste, las arcillas con su baja permeabilidad, limitan este flujo y pueden reducir la efectividad de la recarga.

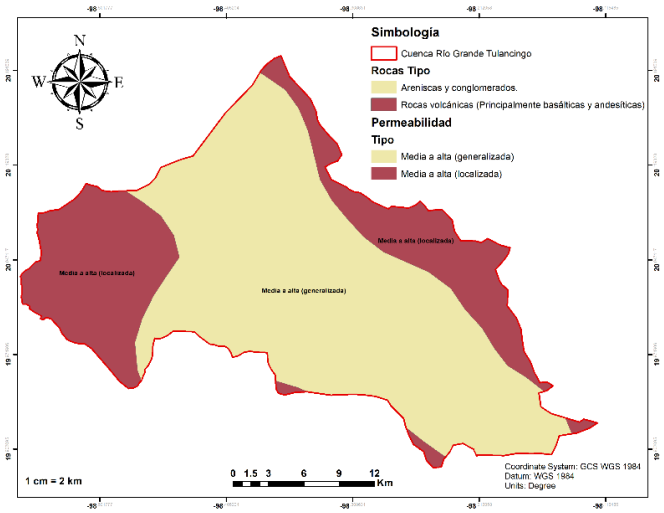

Figura 2. Mapa de permeabilidad presente en los principales tipos de roca de la Cuenca Río Grande Tulancingo.

Por lo tanto, el tipo de suelo y su permeabilidad no solo afectan la capacidad de recarga del acuífero, sino también la distribución y disponibilidad del agua superficial y subterránea en toda la cuenca. A continuación, se describen algunas características de los materiales encontrados en la zona de recarga:

- Arenas y gravas: Estos materiales suelen tener una alta permeabilidad, lo que significa que permiten un flujo de agua relativamente rápido a través de ellos. Valor medio: 10-3 a 10-2 cm/s
- Arcillas: Estas, por otro lado, suelen tener una permeabilidad más baja debido a su estructura finamente laminada y sus poros más pequeños limitando así el flujo de agua y la recarga del acuífero en comparación con las

arenas y gravas. Son comunes en áreas con inundaciones estacionales. Valor medio: 10-7 a 10-6 cm/s

- Rocas volcánicas fracturadas: Tienen alta permeabilidad en las zonas de fractura, actuando como vías preferenciales para el flujo de agua subterránea. Valor medio: 10-4 a 10-2 cm/s.
- Material piroclástico poco consolidado: Su permeabilidad es variable dependiendo de la compactación y granulometría del material. Valor medio: 10^{-5} a 10^{-3} cm/s.

Aunque la permeabilidad de la cuenca resulta favorable para la recarga del acuífero, la erosión hídrica puede limitar la permeabilidad de la cuenca, deteriorar la fertilidad de los suelos y la calidad del agua superficial y subterránea, por lo que el objetivo de esta investigación es evaluar la erosión hídrica en la cuenca mediante el método RUSLE y su impacto en la cuenca.

2. Metodología

2.1 Delimitación de la Cuenca del Valle de Tulancingo

La cuenca Río Grande de Tulancingo se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo, entre los paralelos 19° 55´ y 20° 19' de latitud norte y entre los meridianos 98°10' y 98° 33' de longitud oeste. Esta área comprende la totalidad del municipio de Santiago Tulantepec de Lugo; casi la totalidad de los municipios Acatlán, Cuautepec de Hinojosa, Metepec, Tulancingo de Bravo; parcialmente los municipios de Huasca de Ocampo y Singuilucan; así como pequeñas porciones de los municipios de Acaxochitlán, Agua Blanca de Iturbide y Tenango de Doria (Figuras 3 y 4).

2.2 Método RUSLE

Para evaluar la vulnerabilidad de la cuenca, se empleó el método RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), una herramienta ampliamente utilizada para estimar la pérdida de suelo debido a la erosión hídrica, específicamente en su manifestación de erosión laminar y erosión en surcos (Arias *et al.*, 2022). Este método integra varios factores clave que afectan la erosión del suelo:

Erosividad de la lluvia (R): Representa el impacto de la lluvia en la erosión del suelo, considerando la cantidad y la intensidad de las precipitaciones.

Erodabilidad del suelo (K): Mide la susceptibilidad del suelo a la erosión, dependiendo de su composición y estructura.

Longitud y pendiente de la ladera (LS): Evalúa el efecto de la topografía, incluyendo la longitud, ángulo y forma de la pendiente, en la tasa de erosión.

Cobertura y manejo del suelo (C): Refleja el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo del suelo en la protección contra la erosión.

Prácticas de conservación (P): Considera las intervenciones implementadas para reducir la erosión, como terrazas o barreras vegetales.

La ecuación RUSLE se formula para integrar estas influencias y proporcionar una estimación cuantitativa de la pérdida de suelo anual, siendo particularmente útil en la planificación de estrategias de conservación del suelo. Es un método robusto para evaluar cómo las diferentes condiciones ambientales y las prácticas de manejo afectan la estabilidad del suelo y la sustentabilidad de la cuenca (Renard et al., 1994, 1997.

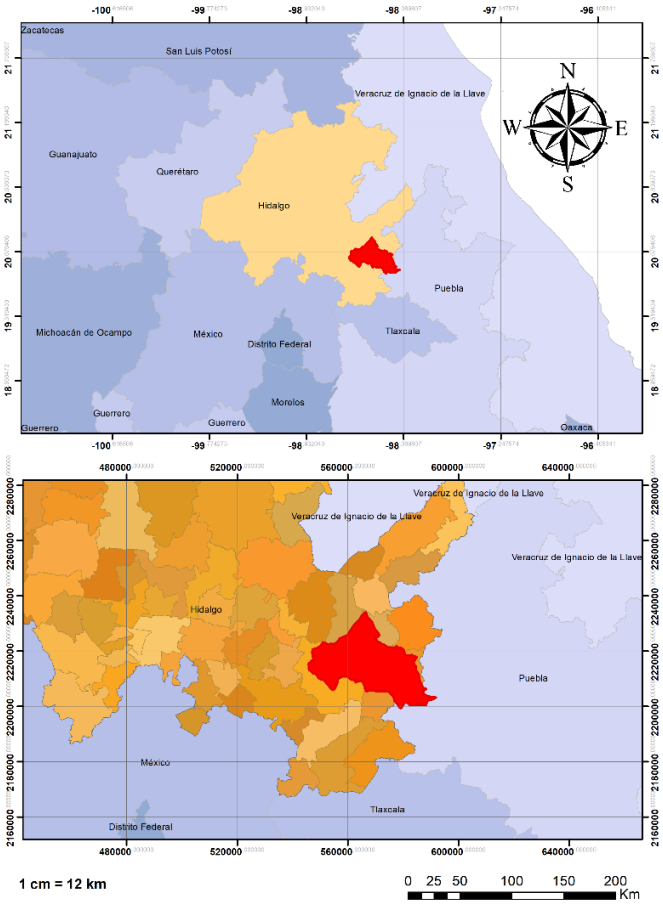

Figura 3. Localización de la Cuenca Río Grande de Tulancingo.

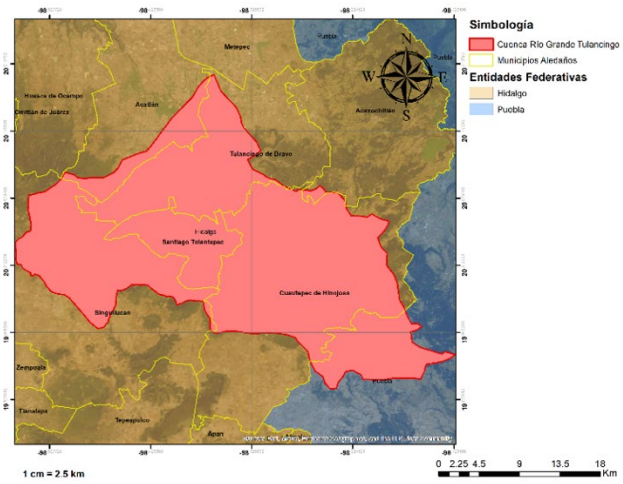

Figura 4. Mapa de delimitación de la Cuenca Río Grande de Tulancingo.

La erosión hídrica se calcula mediante la siguiente ecuación (Wischmeier & Smith, 1978):

$$A=RKLSCP \quad (1)$$

Donde:

- A es la media de la pérdida de suelo anual medido en ton/ha/año.
- R es el factor de erosividad de lluvia medido en MJ mm/ha h.
- K es erodabilidad del suelo medido en t ha h/ha MJ mm.
- L es el factor de longitud de cuesta.
- S es el factor de pendiente de cuesta.
- C es el factor vegetación (cobertura vegetal y manejo)
- P es el factor de prácticas de apoyo o manejo del suelo.

El facto R de erosividad de la lluvia se calcula como:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735\ x\ 10^{\left(1.5\ log_{10}\left(\frac{Pi^2}{P}\right)-0.08188\right)} \quad (2)$$

Donde:

- Pi = Precipitación mensual (mm)
- P = Precipitación anual (mm)

Interpolación de R por la técnica ponderada de distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés).

Para el cálculo del factor R, se tomaron en cuenta 13 estaciones meteorológicas tanto principales como aledañas a la cuenca Río Grande de Tulancingo, de las cuales la variable a tomar en cuenta fue la precipitación mensual/anual del año 1966 a 2016, presentadas en la Tabla 2 del Apéndice B. En la Figura 5 se muestra la distribución del factor R en la cuenca.

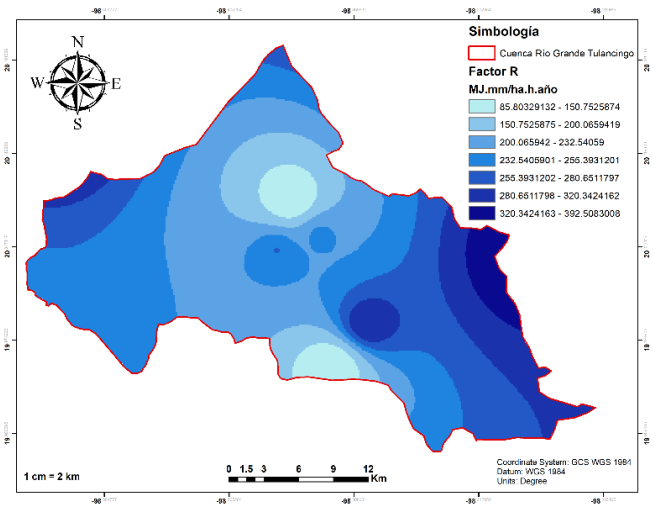

Figura 5. Mapa de Factor (R) Capacidad de la lluvia para erosionar el suelo.

El Factor K, de erodabilidad del suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$K=0.1317*A.B.C.\ D \quad (3)$$

Para este factor se tomaron en cuenta los distintos tipos de suelo en una escala general presente en la cuenca en base a datos geoespaciales brindados en la Carta Edafológica (INEGI, 2023) y con las ecuaciones mostradas a continuación, se obtuvo el valor faltante de erodabilidad para cada uno de los dos tipos de suelo. En la Tabla 3 del Apéndice B se presentan los valores considerados y en la Figura 6 se muestra la distribución de los factores de erodabilidad del suelo K de la cuenca.

$$A = \left[0.2 + 0.3exp\left(-0.256 * \%arena * \left(1 - \frac{\%limo}{100}\right)\right)\right] \quad (4)$$

$$B = \left(\frac{\%limo}{\%arcilla + \%limo}\right)^{0.3} \quad (5)$$

$$C = \left[1 - \frac{0.25 * \%CO}{\%CO + exp(3.72 - 2.95 * \%CO)}\right] \quad (6)$$

$$D = \left[1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{\%arena}{100}\right)}{\left(1 - \frac{\%arena}{100}\right) + exp\left(-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{\%arena}{100}\right)\right)}\right] \quad (7)$$

Donde:

- %arena = Porcentaje de arena (diámetro de partículas 0.05-2.00 mm)
- %limo = Porcentaje de limo (diámetro de partículas 0.002-0.05 mm)
- %arcilla = Porcentaje de arcilla (diámetro de partículas < 0.002 mm)
- %CO = Porcentaje de carbono orgánico contenido en el suelo.

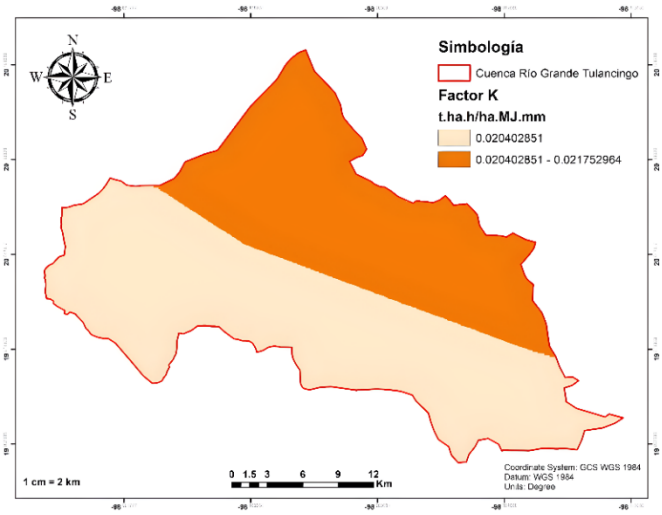

Figura 6. Mapa del factor de erodabilidad (K). Vulnerabilidad del suelo para ser erosionado.

El factor L de Longitud por el factor S de pendiente de cuesta, se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$LS = \left({}^{\lambda}/_{22.13}\right)^{m} * S \quad (8)$$

$$m = {}^{\beta}/_{(1+\beta)} \quad (9)$$

Donde:

- λ = Longitud de pendiente contribuyente (m)
- m = Exponente longitud-pendiente (adimensional)

El valor de β a su vez, se calcula como:

$$\beta = \frac{Sen\ \theta / 0.0896}{3(Sen\ \theta)^{0.8} + 0.56} \quad (10)$$

$S = 10.80 * Sen\,\theta + 0.03$ para $S < 9.00\,\%$
$S = 16.80 * Sen\,\theta - 0.5$ para $S \geq 9.00\,\%$

Donde:

- β = Relación entre la erosión causada por flujo y por el impacto de la lluvia
- θ = Ángulo de la pendiente en grados (radianes)

$$\lambda = \left(\frac{FA}{3.1416}\right)^{0.5} \tag{11}$$

Donde FA es el área de contribución de flujo.

Los datos de pendiente fueron obtenidos del Modelo Digital de Elevación general del cuadrante en el que se encuentra la cuenca, descargándose de la base de datos presente en Consortium for Spatial Information. (CGIAR, 2024).

Con base en los datos recabados, se obtienen los siguientes mapas de las variables a considerar para la obtención del Factor LS (Figuras 7 y 8).

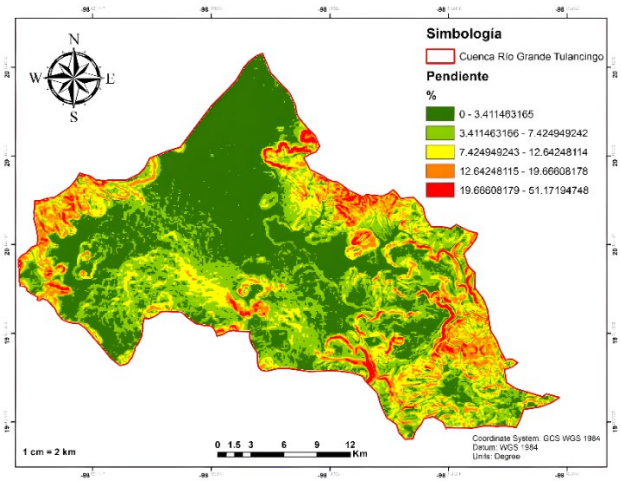

Figura 7. Mapa de pendiente en porcentaje.

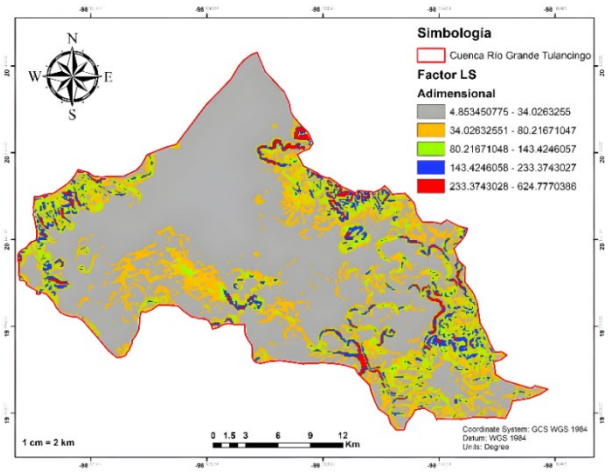

Figura 8. Mapa del factor topográfico (LS).

El factor C, se obtuvo con base al uso de suelo presente en la cuenca, datos geoespaciales (INEGI, 2023) y agregando valores de referencia se agrega una reclasificación:

- Área Agrícola (RAS) factor C = 0.04
- Bosque (BP) factor C = 0.01
- Cuerpo de água (H2O) factor C = 0
- Zonas Urbanas (ZU) factor C= 0.1
- Matorral (MC/MCA) factor C= 0.2
- Otros tipos de vegetación (Chaparral)(ML) factor C= 0.4
- Pastizal (E-PI) factor C = 0.13

Valores de Referencia: Wischmeier y Smith (1978), Röder et al. (2006) yLianes et al. (2009).

En síntesis, para comprender y evaluar la vulnerabilidad de la cuenca del Río Grande de Tulancingo, se empleó un enfoque multidisciplinario que combinó datos geoespaciales, climáticos y de teledetección, utilizando herramientas avanzadas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este enfoque permitió realizar un análisis exhaustivo de los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal, así como su impacto en la sostenibilidad de los recursos hídricos de la región.

1. Datos Geoespaciales. Se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) para recopilar y analizar una amplia gama de datos espaciales. Estos datos incluyeron mapas de uso del suelo, topografía, hidrografía y cobertura vegetal, obtenidos de fuentes confiables como el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y Conagua (Comisión Nacional del Agua). Estos mapas proporcionaron una base sólida para el análisis espacial y permitieron identificar áreas críticas dentro de la cuenca.
2. Datos Climáticos. Se integraron registros históricos de precipitación, temperatura y eventos climáticos extremos, proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para evaluar cómo las condiciones climáticas han influido en la evolución del paisaje y la disponibilidad de agua en la cuenca. Estos datos climáticos fueron fundamentales para correlacionar los cambios en el uso del suelo con las variaciones en las condiciones meteorológicas y para anticipar futuros escenarios bajo el impacto del cambio climático.
3. Análisis de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal. Con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se descargaron y procesaron archivos shapefiles del portal IDEA, que contenían información detallada sobre el uso del suelo y la cobertura vegetal en diferentes períodos de tiempo. Estos archivos shapefiles fueron integrados con otros datos geoespaciales y climáticos para realizar un análisis multitemporal que permitiera identificar y cuantificar los cambios en la cobertura del suelo.
4. Clasificación del Uso de Suelo. Para detectar y analizar el uso del suelo, se utilizó la información disponible de las imágenes satelitales, lo que permitió categorizar el suelo en diferentes clases de uso (por ejemplo, áreas urbanas, agrícolas, forestales).

Finalmente se revisaron datos de calidad del agua en la cuenca para inferir su relación con la erosión hídrica y la vulnerabilidad de la cuenca.

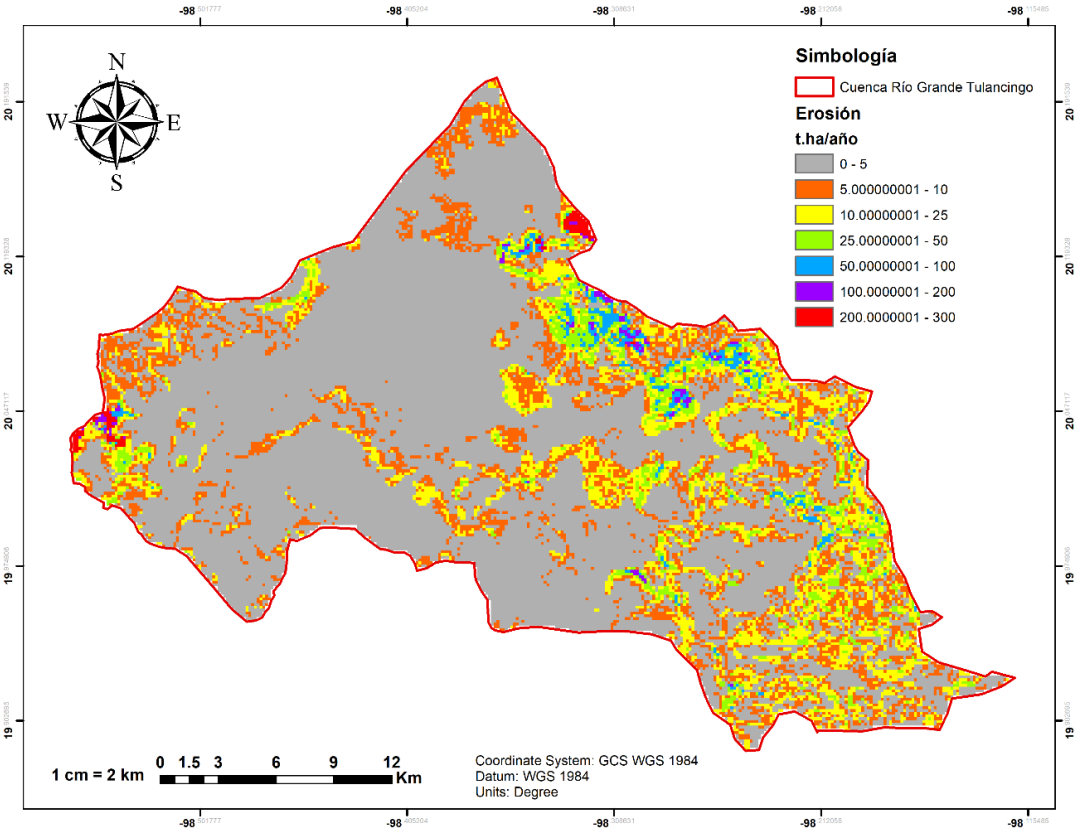

Figura 9. Mapa de erosión y perdida de suelo.

3. Resultados

La aplicación del método RUSLE permitió estimar la pérdida de suelo debido a la erosión hídrica. Se observó que las áreas con mayor pendiente y menor cobertura vegetal son las más susceptibles a la erosión, con tasas que llegan a superar los 300 t/ha/año en algunas zonas (Figura 9).

Se identificaron zonas críticas donde la erosión del suelo es extrema, principalmente en áreas agrícolas cercanas a zonas urbanas como la ciudad de Tulancingo (Figura 10). Estas áreas requieren de manera urgente la implementación de prácticas de conservación del suelo. En el Apéndice A, se describen las características de la erosión para cada intervalo de erosión.

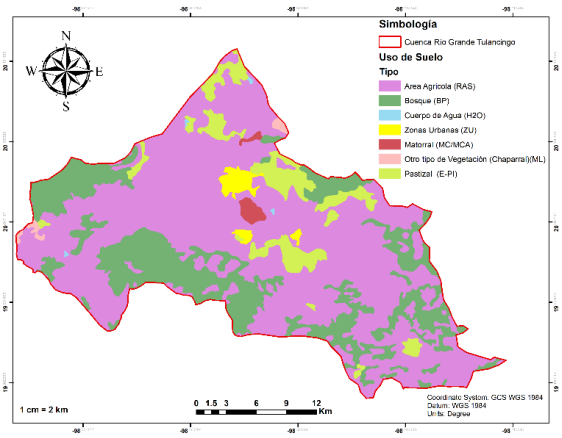

Figura 10. Distribución del tipo de uso de suelo principal en la Cuenca Río Grande Tulancingo que da paso a la erosión.

3.1. Impacto de la Urbanización

Pérdida de Suelos Permeables. El crecimiento urbano ha provocado una disminución de suelos permeables, lo que ha aumentado la escorrentía superficial y, consecuentemente, la erosión y la contaminación de los cuerpos de agua de la cuenca.

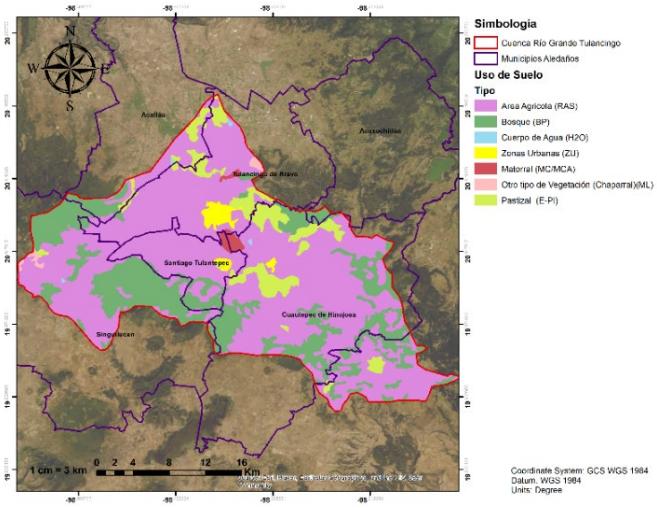

Figura 11. Distribución de los usos de suelo en los municipios que integran la cuenca.

La reducción en la capacidad de infiltración debida a la erosión hídrica y la urbanización ha alterado los patrones hidrológicos naturales de la cuenca.

Aumento de Escorrentía y Sedimentación. La urbanización no planificada ha llevado a una reducción en el área de infiltración, y, por tanto, a un aumento de la escorrentía, lo que ha contribuido a la sedimentación en cuerpos de agua, afectando la calidad del agua y la capacidad de almacenamiento del acuífero.

En las Figuras 11 y 12 se muestra la distribución del uso de suelo y la erosión con respecto a los municipios.

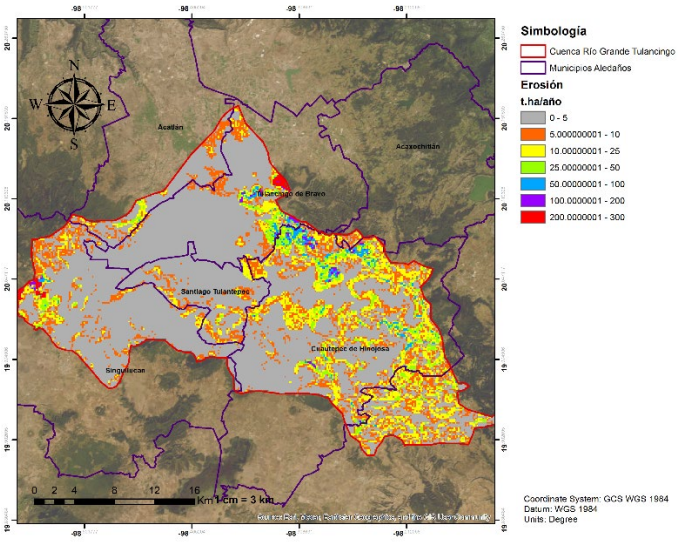

Figura 12. Distribución de la erosión en los municipios que integran la cuenca.

En estas figuras puede observarse que la mayor erosión se encuentra en la parte alta de la cuenca, correspondiente al centro del municipio de Tulancingo, al NO de Singuilucan, al N de Cuautepec y al NE de Santiago Tulantepec.

3.2. Calidad del agua

En la Figura 13 se localizan los principales 5 pozos localizados dentro del área de la Cuenca Río Grande analizados por CONAGUA (2012-2023). Estos pozos cuentan con una toxicidad Alta, Baja y Moderada determinada con base en su Demanda Química de Oxígeno (DQO), Coliformes Fecales (CF), E. coli, nitratos y fosfatos.

En 4 de los 5 pozos analizados se tiene una contaminación de moderada a alta, lo que indica que el acuífero está siendo afectado por las actividades realizadas en la cuenca.

Estos resultados mostraron que, bajo escenarios de aumento en la urbanización y cambio climático, se espera una disminución en la recarga del acuífero y un incremento en los eventos extremos como inundaciones, lo que incrementa la vulnerabilidad de la cuenca. Por lo tanto, denotan la necesidad urgente de implementar medidas de gestión sostenible en la cuenca del Río Grande de Tulancingo, enfocándose en la conservación del suelo, la mejora de la infraestructura de tratamiento de aguas residuales, y la regulación del crecimiento urbano.

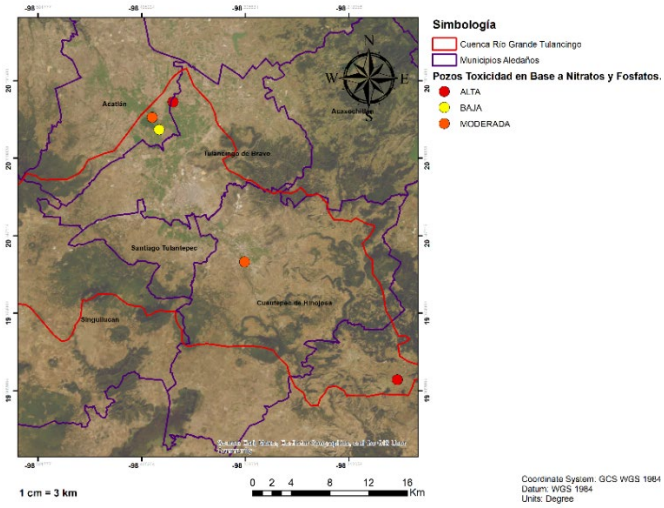

Figura 13. Calidad del agua en los principales pozos de la cuenca y correlación con los municipios asociados.

4. Discusión

4.1. Interacción entre Urbanización y Calidad del Agua

La urbanización altera los patrones de infiltración y escorrentía, aumentando la carga de contaminantes en las aguas superficiales. Es esencial implementar medidas de gestión que mitiguen estos efectos, como la construcción de infraestructura verde que promueva la infiltración y reduzca la escorrentía.

4.2. Agricultura y Contaminación

La agricultura intensiva y el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas contribuyen significativamente a la contaminación del agua. Es necesario promover prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el uso de químicos y optimicen la utilización de recursos hídricos.

4.3. Efectos del Cambio Climático

El cambio climático puede alterar los patrones de precipitación, aumentando la frecuencia y severidad de eventos extremos como inundaciones y sequías. Estas condiciones extremas pueden aumentar la vulnerabilidad de la cuenca a la erosión y la contaminación, destacando la necesidad de estrategias de adaptación y mitigación.

4.4. Limitaciones:

Queda pendiente la realización de encuestas periódicas para obtener la percepción pública ante las medidas propuestas y su aplicación, fallas, aciertos. De igual forma, queda pendiente evaluar el impacto de la contaminación del agua en actividades económicas locales, como la agricultura, la pesca y el turismo. Estimar los costos asociados con la atención médica y la pérdida de productividad debido a problemas de salud relacionados con el agua contaminada.

Conclusiones

La cuenca del Río Grande de Tulancingo enfrenta múltiples desafíos debido a la urbanización, la actividad agrícola e industrial, la erosión y el cambio climático. Es crucial implementar una gestión integrada de la cuenca para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos. Las recomendaciones incluyen la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, la mejora del tratamiento de aguas residuales y la implementación de políticas que protejan las zonas de recarga y reduzcan la carga de contaminantes.

Recomendaciones:

Implementación de Programas de Monitoreo Continuo

Establecer programas de monitoreo continuo de la calidad del agua en colaboración con autoridades locales y organizaciones comunitarias.

Medidas de Mitigación

Promover prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan el uso de fertilizantes y pesticidas.

Mejorar el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas antes de su descarga en cuerpos de agua.

Fomentar la reforestación y la conservación de zonas de recarga hídrica.

Educación y Sensibilización

Desarrollar campañas educativas para informar a la población sobre los riesgos de la contaminación del agua y las medidas preventivas que pueden tomar.

Políticas y Regulaciones

Fortalecer las políticas y regulaciones ambientales para controlar y reducir las fuentes de contaminación.

Implementar sanciones para actividades que contribuyan significativamente a la contaminación del agua.

Referencias

Arias M, P., Saz, M.A. y Escolano, S. (2023). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador. Investigaciones Geográficas, (79), 207-230. https://doi.org/10.14198/INGEO.22390.

Barragan A., M. C., Daza L., N. M., Calderón L., Y., Navarro C., L. F., & Tosse L., O. (2018). Guía metodológica para la formulación de los planes de manejo ambiental de microcuencas – PMAM. Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental., 48.

CGIAR Consortium for Spatial Information. (2024). SRTM data download. CGIAR-CSI. Recuperado de https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/

Cruz-Sánchez, M., Avila-Ortíz, A., Mora-Monzalvo, V., Girón-García, P., Salcedo-Luna, M. C., (2020). Hidroquímica e índice de calidad del Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo, México. Tendencias en Docencia e Investigación en Química, 6 (6), pp. 147-156.

CONAGUA (2023). Normales Climatológicas por Estado. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Recuperado de: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado.

Diario Oficial de la Federación (2024). Acuerdo por el1 que se dan a conocer las cuencas hidrológicas y los acuíferos que corresponden a las unidades administrativas del nivel nacional y regional hidrológico-administrativo de la Comisión Nacional del Agua. Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Ganasri, B.P., Ramesh, H. (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin, Geoscience Frontiers, http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007.

Giménez S., M. C. (2008). Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los Modelos RUSLE y USPED. Aplicación al Arroyo del lugar, Guadalajara (España). Recuperado de: https://oa.upm.es/1914/1/MARTIN_CRUZ_GIMENEZ_SUAREZ.pdf.

Herrera, E., Magaña, V., & Morett, S. (2018). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova scientia*, *10*(21), 191-206. https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527

I-nstituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Carta Edafológica. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Uso de suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/

Lianes, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (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 Birrís, Costa Rica. Agronomía Costarricense, 33(2), 217-235. https://www.redalyc.org/pdf/436/43613279007.pdf.

Mahala, A. (2018). Soil erosion estimation using RUSLE and GIS techniques-a study of a platea ufringe region of tropical environment. Arabian Journal of Geosciences. https://doi.org/10.1007/s12517-018-3703-3.

Pérez-Molina, J. R., & López-Morales, C. A. (2021). Modelado hidrológico y análisis de vulnerabilidad en la cuenca del Río Grande de Tulancingo frente al cambio climático. Revista Mexicana de Ingeniería Hidráulica, 36(2), 45-63.

Organización de las Naciones Unidas. (2020.). Contaminación del agua. Naciones Unidas. Recuperado de https://www.un.org/es/global-issues/water

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.

Röder J., Villavicencio G., R. y Zarazúa V., P. (2006). Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo "USLE" en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida "Sierra de Quila". Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA). Universidad de Guadalajara, Jalisco.

Servicio Geológico Mexicano, (2024, consultado 28 de junio). Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Tulancingo. Subdirección de Recursos Minerales. Gerencia de Geología Hidrogeología y Geología Ambiental. http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Tulancingo-Ordenamiento-Ecologico-Territorial.pdf

Torres-Suarez, S.L. Bolaños-González MA, Ibáñez-Castillo L, Quevedo-Nolasco A, Arteaga-Ramírez R, Rico-Sánchez A, Vaquera-Huerta H., (2024). Spatial-temporal surface water availability in the Tulancingo River basin, Hidalgo, Mexico.Agrociencia. https://doi.org/ 10.47163/agrociencia. v58i4.2904

Williams, J.R. (1995). Chapter 25. "The EPIC model. In V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology". Water Resources Publications.

Wischmeier, W. H. and Smith, D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S.D.A. Agriculture Handbook 537: 58 p.

Apéndice A. Erosión del Suelo

La aplicación del método basado en la Ecuación RUSLE mostró que las áreas con mayor pendiente y menor cobertura vegetal son las más susceptibles a la erosión hídrica. La erosión contribuye a la sedimentación de cuerpos de agua y a la disminución de la calidad del agua.

De acuerdo con la interpretación de los valores obtenidos, tenemos entonces:

- Pérdida de suelo 0 (t.ha/año) = Zonas no susceptibles al proceso erosivo.
- 0 a 5 = Zonas con niveles de erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables.

- 5 a 10 = Zonas con niveles de erosión y pérdidas de suelo tolerable.
- 10 a 25 = Zonas con procesos erosivos leves. Erosión sin ser apreciable a simple vista.
- 25 a 50 = Zonas con procesos erosivos moderados.
- 50 a 100 = Zonas con procesos erosivos graves. Existe erosión y es apreciable a simple vista.
- 100 a 200 = Zonas con procesos erosivos muy graves. Existe erosión y se manifiesta a simple vista.
- 200 y más = Zonas con procesos erosivos extremos. Existe erosión y es evidente a simple vista.

Apéndice B. Datos meteorológicos, de tipo de suelo y descripción de los intervalos de erosión

Tabla 1. Datos geográficos de las estaciones meteorológicas (CONAGUA, 2023).

N° estación	Nombre Estación	Altitud	X	Y
1	Presa La Esperanza	2218	569597.56	2217829.09
2	Santiago Tulantepec	2179	566058.45	2216523.86
3	Tulancingo (Obs)	2207	567174.15	2220924.95
4	San Lorenzo Sayula	2768	573521.82	2210221.2
5	El Aserradero	2610	570543.48	2206520.43
6	Singuilucan	2650	550948.28	2207651.15
7	Ahuazotepec	2419	586395.58	2216183.14
8	Santa María Asunción	2190	575881.97	2228768.45
9	El Zembo	2311	546328.12	2229186.87
10	Presa Tezoyo	2611	572420.06	2195492.36
11	Metepec	2147	570590.35	2237815.57
12	Chignahuapan	2291	601282.18	2194004.05
13	Presa El Girón	2589	536247.03	2219541.83

Tabla 2. Precipitación total mensual del periodo 1966 - 2016 (mm) (CONAGUA)

N°	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total Anual
1	10.20	11.09	19.11	39.66	48.61	81.70	83.95	80.14	104.75	63.03	15.60	6.83	564.68
2	12.57	14.06	18.53	38.67	53.66	90.10	96.52	83.84	107.96	61.36	14.15	7.69	599.10
3	4.04	6.66	10.55	13.95	15.97	29.64	34.07	33.28	40.29	23.57	8.16	2.42	222.60
4	12.29	17.32	22.79	47.98	54.88	114.44	101.19	97.89	141.35	79.48	24.54	10.48	724.63
5	4.04	6.66	10.55	13.95	15.97	29.64	34.07	33.28	40.29	23.57	8.16	2.42	222.60
6	11.60	14.22	20.60	41.56	52.61	95.42	98.16	87.11	100.01	54.83	18.10	8.19	602.41
7	14.36	17.53	20.14	37.19	48.65	113.31	142.33	120.77	190.31	100.59	30.35	5.47	841.00
8	13.80	14.17	16.18	28.19	36.50	74.34	104.78	82.49	125.66	93.71	31.67	13.26	634.74
9	15.82	17.18	19.02	38.48	75.64	147.05	145.37	146.39	186.68	94.19	29.63	9.44	924.91
10	9.88	13.10	20.36	41.12	58.84	103.54	114.70	97.13	109.88	58.63	16.98	7.97	652.13
11	12.37	12.45	17.67	27.97	39.97	92.49	102.61	104.93	136.63	65.75	23.69	8.88	645.42
12	12.68	13.87	21.51	37.54	51.26	124.71	123.72	117.71	140.58	82.89	24.93	11.16	762.55
13	10.63	11.28	16.67	34.24	43.39	70.65	69.91	61.54	67.15	38.02	10.82	6.13	440.45

Tabla 3. Principales tipos de suelo presentes en la cuenca, valores de sus porcentajes de arena, limo, arcilla y los valores de acuerdo con las fórmulas generada para la obtención final del factor de erodabilidad de suelo (factor K).

FID	DOMSOI	Tipo	Descripción	% Arena	% Limo	% Arcilla	% CO	A	B	C	D	Krusle	Factor K
0	Tv	Andosol Vítrico	Gruesa	64.50	26.20	9.30	1.40	0.29	0.69	0.83	1.00	0.17	0.02
1	Tv	Andosol Vítrico	Media	75.50	19.50	5.00	0.87	0.26	0.62	0.95	1.00	0.15	0.02