


Criterios para el Manejo del Territorio que Fomenten los Procesos Ecológicos en la Microcuenca del Río de las Avenidas Land Management Criteria to Promote the Ecological Processes in the Watershed of the Avenidas River

K. R. Peña-Baños ^a, C. Contreras-López ^{b,*}, H. I. Navarro-Gómez ^b, J. A. Lozano-Hernández ^b, M. D. Lazcano-Benítez ^c, J. Pérez-Islas ^a.

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, 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.

^c Instituto Municipal de Investigación y Planeación del municipio de Pachuca de Soto, 42000, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El intenso cambio de uso de suelo ha provocado deterioro y pérdida de muchos ecosistemas, por lo que resulta imprescindible una visión integral sobre la comprensión del funcionamiento del territorio que lleve a entrever el comportamiento específico del espacio y permita contar con una base sustentada para tomar decisiones. El objetivo fue identificar la aptitud de conservación del suelo en la microcuenca del río de las Avenidas donde se encuentra Pachuca y su Zona Metropolitana, identificando los atributos físico-naturales que propicien la continuidad de los ecosistemas y fomenten los procesos ecológicos, utilizando Sistemas de Información Geográfica y un análisis multicriterio usando el Proceso Analítico Jerárquico. Los resultados muestran que muchas zonas que deberían de conservarse tienen una huella antrópica, por lo que se deben tomar en cuenta los factores con más influencia como los ecosistemas actuales, las pendientes y escurrimientos, ya que son fundamentales para el incremento de los procesos ecológicos, además de la disminución de riesgos en áreas urbanas.

Palabras Clave: Aptitud del suelo, Análisis multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico, Conservación, Servicios ecosistémicos.

Abstract

The intense change in land use has caused the deterioration and loss of many ecosystems, making a comprehensive understanding of how the territory functions is essential. This approach provides insight into the specific behaviour of the space and provides a sound basis for decision-making. The objective was to identify the land capability for conservation in the watershed of the Avenidas river, where Pachuca and its metropolitan area are located, identifying physical and natural attributes for its natural conservation that promote ecosystem continuity and ecological processes. This approach uses Geographical Information Systems (GIS) and a multi-criteria analysis using the Analytical Hierarchical Process (AHP). The results show that many areas that should be conserved have an anthropogenic footprint, so the most influential factors, such as current ecosystems, slopes, and runoffs, must be taken into account, as they are essential for increasing ecological processes and reducing risks in urban areas.

Keywords: Land capability, Multi-criteria analysis, Analytical Hierarchical Process, Conservation, Ecosystem services.

1. Introducción

Durante la última parte del siglo XX y lo que lleva este siglo XXI, la huella antrópica en el medio ambiente mexicano ha sido notoria debido al intenso cambio de uso de suelo y el subsecuente deterioro de los ecosistemas (Bocco et al., 2005).

La deforestación ha sido estimada en alrededor de 534,707 hectáreas por año en promedio, mientras que 506,295 ha al año de vegetación primaria han sufrido alguna alteración (Rosete Vergés et al., 2014); entre el 55% y el 62% del territorio mexicano presenta algún grado de afectación por erosión hídrica, eólica y degradación química y física (Etchevers et al.,

*Autor para la correspondencia: christopher_contreras@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: pe358410@uaeh.edu.mx (Kenya Roshell Peña-Baños), christopher_contreras@uaeh.edu.mx (Christopher Contreras-López), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Iván Navarro-Gómez), jairo_lozano@uaeh.edu.mx (Jairo Armando Lozano-Hernández), miguelazcano09@gmail.com (Miguel Dionisio Lazcano-Benítez), pe356586@uaeh.edu.mx (Jaqueline Pérez-Islas).

Historial del manuscrito: recibido el 10/08/2025, última versión-revisada recibida el 22/09/2025, aceptado el 08/10/2025, publicado el 05/12/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15667>.



2019); además, de las 13 zonas hidrológicas administrativas de México, ocho sobrepasan la media del grado de presión hídrica de manera importante, y la región XIII, perteneciente al Valle de México, tiene un grado muy fuerte de presión hídrica, debido a que existe una desproporción significativa entre la concentración de población, 19.8% del país, y la disponibilidad del agua renovable media, además de los impactos ocasionados por su uso (Farrel Baril et al., 2013). Lo anterior ha sido generado por el uso inapropiado de los recursos, que deberían ser aprovechados de manera adecuada (Bocco et al., 2005).

Es así que, la huella antrópica es una amenaza para muchos hábitats y especies naturales, por lo que, para contrarrestar estos efectos adversos de la urbanización y garantizar que la expansión de las ciudades se produzca de forma sostenible, es necesario tener en cuenta conocimientos ecológicos en la planificación urbana (Niemelä, 1999). Por lo que resulta imprescindible considerar que el conocimiento de los procesos biológicos en el territorio permite tomar decisiones para el manejo adecuado de la biodiversidad (Salazar Marcial, 2021). Por consiguiente, un enfoque ambiental para el análisis del territorio proporciona una visión integral sobre la comprensión del funcionamiento de los factores naturales y antrópicos sobre un sitio, lo que lleva a vislumbrar el comportamiento específico del espacio y permite contar con una base fundamentada para tomar decisiones tanto en uso de suelo como en el tratamiento que debe recibir el espacio (López de Juambelz, 2012).

En este sentido, la conservación de la naturaleza con base en la identificación y protección de los activos naturales, como los ecosistemas, es importante, ya que el establecimiento y la identificación de hábitats amenazados, son componentes esenciales para las estrategias de conservación, pero no son eficaces a largo plazo, a menos que se mantengan también los procesos ecológicos que sustentan a las áreas de conservación y protección (Bennet et al., 2009). De modo que los procesos ecológicos son esenciales para la conservación y se ven perjudicados por amenazas antropogénicas en extensiones de vegetación natural, donde se ven afectados los movimientos de los vertebrados a escala local y regional que sustentan la composición de los ecosistemas y las interacciones entre plantas y animales, como la polinización y la nectarivoría (Ortega et al., 2023). Por otro lado, la planeación debe considerar también a las tierras agrícolas, donde se han sustituido las comunidades vegetales naturales por comunidades de cultivo homogéneas, hasta el punto de que son, estructural y funcionalmente, muy diferentes a los ecosistemas naturales (Nicholls et al., 2015); y también considerar a los sistemas fluviales en el territorio, ya que los flujos hidrológicos influyen en el desarrollo de los hábitats biofísicos naturales en estos sistemas hídricos, pero que si son alterados, pueden provocar erosión, pérdida de ecosistemas e inundaciones en las partes bajas del territorio (Fang et al., 2022).

De modo que, para comenzar a contrarrestar todos los efectos adversos mencionados, es necesario en cualquier plan de desarrollo, un análisis de la aptitud del suelo, ya que, este tipo de análisis, provee información necesaria para conocer las vocaciones reales naturales del territorio, en función de estas cualidades, es posible establecer la selección priorizada de usos para un espacio, que reduzca los conflictos ambientales que se originan entre los distintos sectores socioeconómicos que actúan sobre el mismo (Bollo Manent et al., 2010). En este

sentido, es imprescindible el conocimiento de los factores naturales y antrópicos que inciden en el territorio y a su vez, identificar los atributos que son clave para la conservación como base para la definición de su aptitud natural que tienen como alcance la política de optimización del uso de suelo (Pablo Pablo y Hernández Santana, 2016). La base para la optimización en el manejo del territorio es la evaluación que permita valorar y ponderar las potencialidades intrínsecas de los atributos naturales de una región, así como identificar sus mejores vocaciones naturales (Bollo Manent et al., 2010).

Es así que, el objetivo del presente trabajo radica en desarrollar un análisis de aptitud del suelo en la microcuenca del río de las Avenidas que conforma la parte norte del Valle de México y en específico a la ciudad de Pachuca y su Zona Metropolitana, identificando los atributos clave para la conservación natural, que además propicien la continuidad de los ecosistemas y con eso se contribuya al fomento de los procesos ecológicos de la región. Este trabajo se realizó utilizando un análisis territorial con Sistemas de Información Geográfica y un análisis multicriterio para la identificación de las vocaciones ambientales y de conservación, usando el Proceso Analítico Jerárquico (Saaty, 1987).

2. Metodología

El primer paso, a fin de lograr la aptitud del suelo para la conservación natural, fue el análisis del territorio, para tener una visión integral sobre la comprensión del funcionamiento de los factores naturales y antrópicos sobre el sitio, lo que lleva a vislumbrar el comportamiento específico de la zona de estudio y establecer una base fundamentada para la toma de decisiones tanto en uso de suelo como en el tratamiento que debe recibir el espacio (López de Juambelz, 2012), en este caso específico el de la microcuenca del río de las Avenidas. La información del análisis cartográfico es la base, a partir de ésta, se realizan planos de los diversos factores naturales y antrópicos que permiten la comprensión detallada del comportamiento de la región de estudio.

Para la investigación de los patrones espaciales de protección ambiental para la conservación y la identificación de las relaciones entre los factores que contribuyen a ésta, se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (Villegas Martínez, 2021), en específico el programa ArcGIS Pro 3.3.0 versión educacional avanzada. Después de coleccionar los datos, la identificación de las zonas de conservación que necesitan protección ambiental se basan en un análisis multicriterio, este tipo de métodos se utilizan para analizar de manera simultánea la heterogeneidad ambiental de una condición o proceso específico (Cruz Ortiz et al., 2020). En este sentido, se utiliza el Proceso Analítico Jerárquico, que es un método multicriterio para organizar y analizar decisiones complejas basadas en criterios múltiples, ya que permite organizar estos criterios de manera estructurada y cuantitativa (Saaty, 1987). Con los resultados se pueden tomar las medidas de protección, mitigación y potenciación de la región.

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio es la microcuenca del río de las Avenidas, que está conformada administrativamente por la ciudad de Pachuca y su zona metropolitana, compuesta además

por porciones de los municipios de Mineral del Chico al norte, Mineral de la Reforma y Epazoyucan al oriente, Singuilucan al suroriente, Zempoala al sur, Zapotlán de Juárez al suroccidente, San Agustín Tlaxiaca al occidente y Mineral del Monte al noroccidente, con una extensión de 37,134 hectáreas. Se trazaron los límites tomando en cuenta los parteaguas de la región, que se definieron a partir de las cimas, puertos e interfluvios de los relieves, sin embargo, para evitar que el trazo contenga un área enorme, se definió la microcuenca en la parte sur a través de los escurrimientos. Resueltos los límites de la polygonal a partir de la topografía y la hidrología, se establecieron las áreas urbanas y las vías de comunicación, como se perciben en la Figura 1, para obtener un mapa base y comenzar con el análisis del territorio.

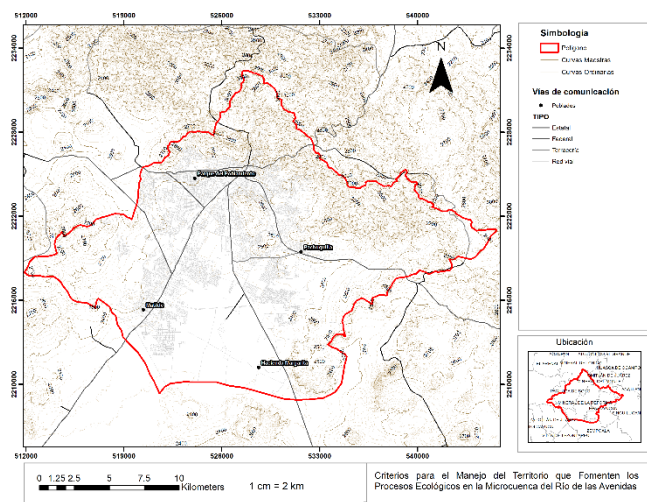


Figura 1: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2021).

2.2. Datos colectados

La información sobre los ecosistemas dentro de la microcuenca se obtuvo de la carta de Uso de Suelo y Vegetación de Pachuca de Soto F14-11 (INEGI, 2015), además de que se utilizó como referencia a la guía de interpretación cartográfica para establecer un primer acercamiento de las especies vegetales dentro de cada ecosistema (INEGI, 2017). Dentro de la microcuenca, como se muestra en la Figura 2, se encuentra lo siguiente:

- Ecosistemas sanos, representados por bosques, como el de oyamel, que se caracteriza por la presencia de árboles de éste género, además de otros géneros como el pino; bosque de encino, con especies por lo regular de este género; bosque de táscate formado por árboles escumifolios, de éste género, además de enebro y cedro; bosque de pino-encino que se conforman con diferentes especies de estos tipos de árboles, aunque con dominancia del primero. Además de matorrales, como el desértico rosetófilo que se caracteriza por especie con hojas en roseta con o sin espinas sin tallo aparente o bien desarrollado, y el desértico crasicaule donde la vegetación dominante son las nopaleras y las especies vegetales alcanzan generalmente de 2 a 4 m de altura.
- Por otra parte, existen ecosistemas como vegetación secundaria, es decir que cuando un tipo de vegetación es eliminada o alterada por diversos factores humanos

o naturales, el resultado es una comunidad significativamente diferente a la original y con una estructura y composición florística heterogénea, que en forma natural y con el tiempo pueden favorecer la recuperación de la vegetación original. Dentro de la polygonal hay bosques de encino, encino-pino, oyamel y táscate, además de matorral crasicaule con este tipo de fase.

- Pastizal inducido, dominado por gramíneas o graminoides, que aparecen como consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación, además de establecerse en zonas agrícolas abandonadas o áreas que se incendian con frecuencia. Éstos pueden responder o no a una sucesión normal de comunidades vegetales.
- Existe, además, la agricultura de temporal donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran dependen del agua de lluvia.
- Por último, se encuentra el área urbana que es la zona impermeable de la polygonal, donde, aunque existan diversos espacios abiertos o con uso para actividades recreativas, muchas de las especies vegetales por lo regular son exóticas.

En cuanto a la importancia para su protección ambiental y que se fomenten los procesos ecológicos, se tomaron en cuenta, como se muestra en la Tabla 1, a los ecosistemas sanos como los de más importancia y se dejaron con un rango 5, luego los ecosistemas como vegetación secundaria con 4, el pastizal inducido con 3, la agricultura con 2 y la urbanización con muy baja importancia, con 1.

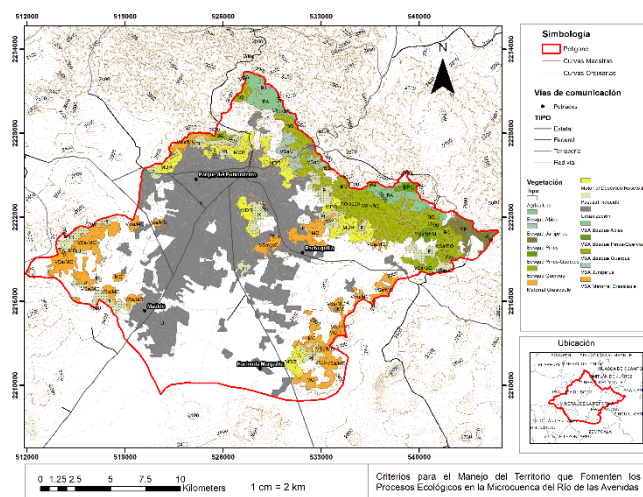


Figura 2: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2015).

Los escurrimientos superficiales se definieron a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico, (INEGI, 2021), a través de las corrientes fluviales marcadas en la topografía, que en su mayoría corren de norte a sur y del oriente al centro. Comienzan como escurrimientos intermitentes de primer y segundo orden, en su mayoría, de las partes altas del lado norte y oriente, que bajan y forman escurrimientos de tercer, cuarto y quinto orden, que en su mayoría también son intermitentes, hasta llegar al valle, donde desfogan en escurrimientos

perennes, el principal es el río de las Avenidas que va de norte a sur, todo esto apreciado en la Figura 3. Por otro lado, se plantearon posibles zonas propensas a la inundación cuando las curvas de nivel se separan en la superficie y no es posible tener una corriente fluvial.

Para la clasificación en la tabla 1, se tomaron en cuenta a los escurrimientos perennes como mayor importancia para su protección ambiental con 5, seguidos de las zonas de inundación con 4, escurrimientos intermitentes que no sean de primero o segundo orden con 3, escurrimientos de primero y segundo orden con 2 y los interfluvios con una menor importancia con 1.

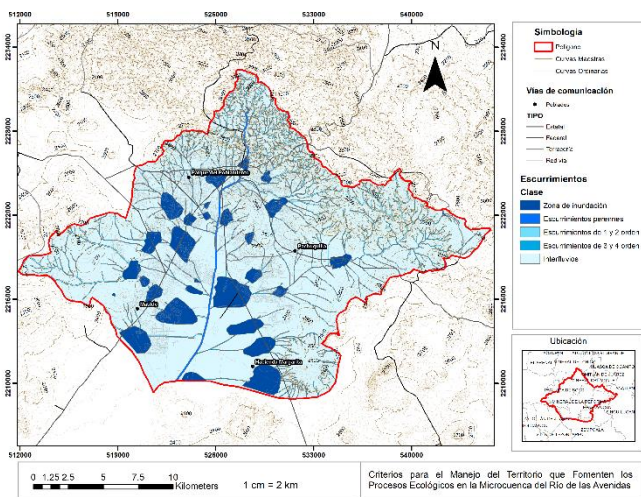


Figura 3: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2021).

Los escurrimientos subterráneos, como se observa en la Figura 4, se dividen por sus formaciones geológicas, en materiales consolidados, que tienen sus constituyentes firmemente unidos, y materiales no consolidados, que son aquellos cuyo origen se debe a los procesos de intemperismo y erosión, además de que cada tipo de material cuenta con posibilidades altas, medias o bajas de que contengan agua (INEGI, 1981; INEGI, 1989). Por lo que se tomaron en cuenta para la clasificación a los no consolidados con posibilidades altas con mayor importancia para su protección ambiental con 5, no consolidado con posibilidades medias con 4, no consolidado con posibilidades bajas con 3, consolidado con posibilidades medias con 2 y consolidado con posibilidades bajas con 1, como se puede observar en la Tabla 1.

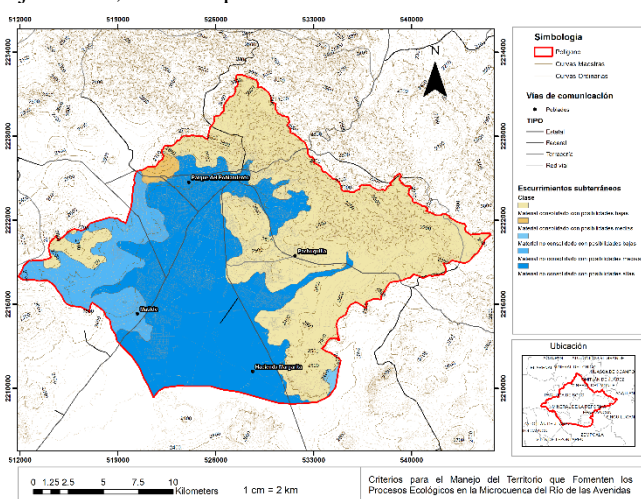


Figura 4: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (1981).

Las pendientes que se observan en la Figura 5, se crearon calculando la relación que existe entre la altura de la curva de nivel y su separación en superficie, por lo que el mapa de pendientes se obtuvo a partir de los datos del modelo digital de elevación de Pachuca de Soto (INEGI, 2000), utilizando el programa ArcGIS Pro 3,3,0 versión educacional avanzada, tomando en cuenta en la reclasificación los rangos de pendientes mayormente utilizadas en México que son: 0° a 2° planicie, 2° a 5° ligeramente inclinado, 5° a 15° moderadamente inclinado, 15° a 30° inclinado y mayor a 30° fuertemente inclinado (Contreras López et al., 2023). En este sentido, se clasificaron las mayores a 30° con 5 de mayor importancia para la protección ambiental, de 15 a 30° con 4, de 5 a 15° con 3, de 2 a 5° con 2 y de 0 a 2° con 1, es decir, con menor importancia ambiental, como se nota en la Tabla 1.

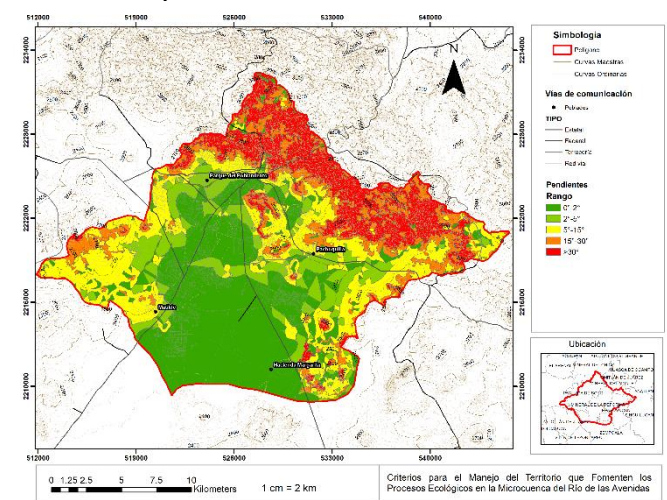


Figura 5: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2021).

El uso de suelo se realizó, como se advierte en la Figura 6, tomando en cuenta la carta de uso de suelo y vegetación serie V de Pachuca de Soto F 14-11 (INEGI, 2015). Los tipos de uso de suelo existentes en la poligonal, son el urbano que ocupa el 40% de la poligonal, el agrícola que ocupa un 30% y el forestal que ocupar 30%, además de pequeñas zonas de manufactura industrial y una presa de residuos industriales mineros. La clasificación se definió para uso forestal con 5, con la mayor importancia ambiental, el pastizal inducido con 4, la zona agrícola con 3, el uso urbano con 2 y el uso industrial con 1, como se advierte en la Tabla 1.

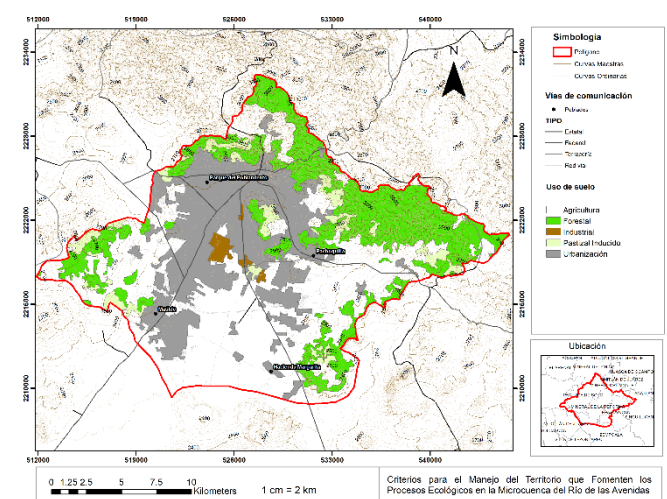


Figura 6: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2015).

Dentro de la polygonal, como se denota en la Figura 7, los suelos que existen son, phaeozem, de color superficial pardo negro, fértil de magnesio y potasio, aunque con muy poco o ningún carbonato en el subsuelo (INEGI, 2011); por otra parte, existe el leptosol que es un suelo con menos de 25 cm de espesor o con más de 80% de su volumen ocupado por piedras o gravas y es muy susceptibles a la erosión, por lo regular, no apto para uso agrícola o frutícola debido a su bajo contenido de nutrientes esenciales para las plantas (Siebe et al., 2003), este suelo se localiza principalmente en la zona de montaña con más de 30° de pendiente; regosol es un suelo pedregoso y se parece bastante a la roca que le dio origen (INEGI, 2011), de textura gruesa que dificulta la penetración de las raíces (Siebe et al., 2003), comunes en las zonas montañosas, en la polygonal se encuentran en las zonas con pendientes mayores a 15°; luvisol es un suelo con alto contenido de arcilla, situado en pendientes fuertes, generalmente fértiles (INEGI, 2011), distribuido en la superficie donde existe bosque de pino; vertisol es un suelo pesado que presenta grietas anchas, abundantes y profundas cuando está seco, son bastante fértiles, además de cambisol, que es un suelo con apreciable contenido de arcilla, muy apto para fines productivos como la agricultura (INEGI, 2011), ambos se encuentran en la parte suroccidental de la polygonal. Por último, los tecnosoles, que combinan suelos, cuyas propiedades y pedogénesis están dominados por su origen técnico e incluyen suelos derivados de desechos originados de las actividades humanas, como los residuos mineros (Camps Arbustain et al., 2008), que en la polygonal se conocen como jales mineros que son residuos de los procesos de beneficio de la minería y son muy bajos o nulos en nutrientes para las plantas (Contreras López, 2016).

La clasificación se desarrolló por nutrientes, donde se estableció al phaeozem con 5, con la mayor importancia ambiental, luvisol, cambisol y vertisol con 4, regosol con 3, leptosol con 2 y los tecnosoles con la menor importancia, quedando con 1, como se observa en la Tabla 1.

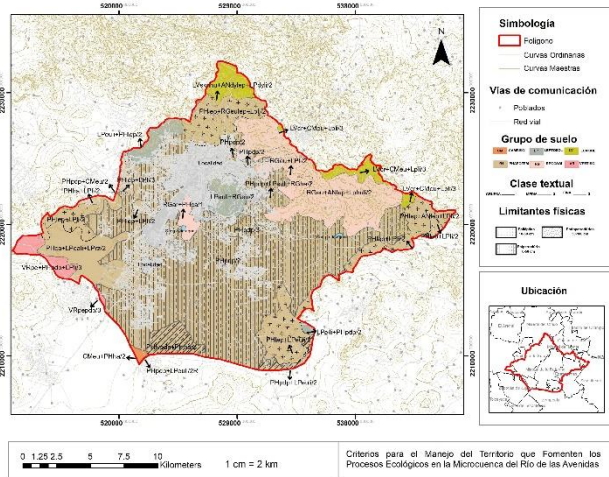


Figura 7: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2013).

Con relación a la erodabilidad, como se observa en la Figura 8, se midió la susceptibilidad y la facilidad con la que el suelo se erosiona una vez impactado, por lo que se realizó el mapa con respecto a los datos de INEGI con respecto a la edafología (INEGI, 2013), y los datos de la vegetación (INEGI, 2015), quedando clasificado con mayor importancia para su protección ambiental, pendientes de más de 15° con o sin capa vegetal con valor de 5; pendientes de 5° a 15° sin capa vegetal

con 4; pendientes de 5° a 15° con capa vegetal con 3; pendientes menores a 5° sin capa vegetal con 2; y las pendientes menores a 5° con o sin capa vegetal con 1, con una menor importancia, ya que no es susceptible a la erosión, por lo que no requiere de conservación de suelo, tal y como se apunta en la Tabla 1.

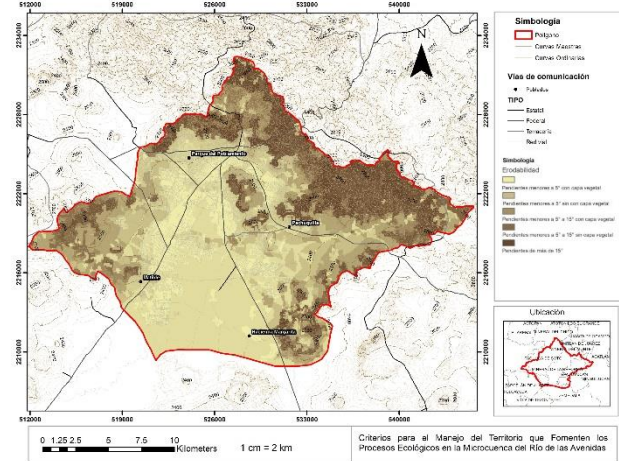


Figura 8: Elaboración propia a partir de la base de datos de INEGI (2013; 2015).

Tabla 1: Variables y criterios de importancia para la protección ambiental

Factor	Características	Unidad	Nivel de importancia	
			Rangos	
Vegetación	Urbanización	Por tipo	1	Muy bajo
	Agricultura		2	Bajo
	Pastizal inducido		3	Moderado
	Ecosistema con Vegetación secundaria		4	Alto
	Ecosistema sano		5	Muy alto
Escurrimientos superficiales	Interfluvios	Por tipo	1	Muy bajo
	Escurrimientos intermitentes de primer y segundo orden		2	Bajo
	Escurrimientos intermitentes que no sean de primer o segundo orden		3	Moderado
	Zonas de inundación		4	Alto
	Escurrimientos perennes		5	Muy alto
Escurrimientos subterráneos	Consolidado con posibilidades bajas	Por tipo	1	Muy bajo
	Consolidado con posibilidades medias		2	Bajo
	No consolidado con posibilidades bajas		3	Moderado
	No consolidado con posibilidades medias		4	Alto
	No consolidado con posibilidades altas		5	Muy alto
Pendientes	0 – 2°	Por grados	1	Muy bajo
	2 – 5°		2	Bajo
	5 – 15°		3	Moderado
	15 – 30°		4	Alto
	>30°		5	Muy alto
Uso de suelo	Industrial	Tipos	1	Muy bajo
	Urbano		2	Bajo
	Agrícola		3	Moderado

Edafología	Pastizal	Por nutrientes	4	Alto
	Forestal		5	Muy alto
	Tecnosol		1	Muy bajo
	Leptosol		2	Bajo
	Regosol		3	Moderado
Erodabilidad	Luvisol, cambisol y vertisol	Por susceptibilidad	4	Alto
	Phaeozem		5	Muy alto
	Pendientes menores a 5° con vegetación		1	Muy bajo
	Pendientes menores a 5° sin vegetación		2	Bajo
	Pendientes de 5° a 15° con vegetación		3	Moderado
	Pendiente de 5° a 15° sin vegetación		4	Alto
	Pendientes de más de 15°		5	Muy alto

fila de la Tabla 3 y estos promedios representan los pesos relativos de los criterios y su influencia expresada en porcentaje, mostrados en la Tabla 4.

Tabla 2: Escala fundamental de importancia y definición	
Importancia de valor	Definición
1	Igual importancia
3	Moderadamente más importante un elemento que otro
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios

Por último, para evaluar la coherencia de la matriz se debe comprobar mediante el radio de consistencia (CR) que se obtiene a partir de la comparación del índice de consistencia (CI) y el índice aleatorio (RI), con la siguiente fórmula.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Donde $RI = 1,32$, obtenido de los valores del índice aleatorio propuestos por Saaty (1987). Además de que CI se calcula con la siguiente ecuación.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Una vez aplicadas las fórmulas, el resultado se comparó con la de la matriz del índice de valores aleatorios, por lo que $CR = 0,060$ es menor a 0,10, es decir que tiene menos del 10% de tolerancia, por lo que el modelo es consistente y los pesos asignados son válidos, así que las comparaciones son aceptables. Luego de que se comprobó la veracidad de los datos, los criterios de peso se convirtieron en la base para determinar los factores que inciden en los criterios de conservación de la microcuenca, quedando la aptitud de conservación (AC) como se muestra en la siguiente ecuación.

$$AC = ([vegetación] * 0,34) + ([pendiente] * 0,25) + ([escurrimientos superficiales] * 0,14) + ([escurrimientos subterráneos] * 0,11) + ([edafología] * 0,06) + ([uso de suelo] * 0,04) + ([erodabilidad] * 0,06)$$

2.3. Proceso Analítico Jerárquico

Es un método sistemático para organizar y analizar decisiones complejas basadas en múltiples criterios, ya que permite organizar estos criterios de manera estructurada y cuantitativa (Saaty, 1987). Este enfoque resulta fundamental para la toma de decisiones informada, ya que implica definir el problema, las alternativas y los factores para determinar la mejor opción basándose en esos criterios, en este caso, las zonas más importantes para la protección ambiental. El primer paso del Proceso Analítico Jerárquico es establecer una escala numérica relativa de criterios, los valores de la escala se definieron en la Tabla 2 y permiten realizar comparaciones por pares entre los criterios de manera consistente (Saaty, 1987). Después se realiza una matriz de comparación por pares, como la que se muestra en la Tabla 3, para comparar cada criterio contra los demás y así determinar su importancia relativa, por lo que se construye una matriz cuadrada donde cada celda a_{ij} representa la importancia del criterio i sobre el criterio j , la matriz es recíproca, si $a_{ij} = x$, entonces $a_{ji} = 1/x$; cabe señalar que la diagonal siempre será 1 ya que los criterios se comparan consigo mismos. A final, se suma cada columna para normalizar los valores en el siguiente paso (Saaty, 1987).

Posteriormente se transforman los valores de la matriz de comparación en pesos relativos, por lo que cada valor se divide entre la suma de su propia columna, para que se puedan comparar los criterios en una escala común, como se muestra en la Tabla 3. El siguiente paso es la determinación del peso final de cada criterio, por lo que se calcula el promedio de cada

Tabla 3: Matriz de comparación por pares

	Vegetación	Pendiente	Escurremientos superficiales	Escurremientos subterráneos	Edafología	Uso de suelo	Erodabilidad
Vegetación	1	3	3	3	5	5	5
Pendiente	1/3	1	3	3	5	5	5
Escurremientos superficiales	1/3	1/3	1	2	3	3	3
Escurremientos subterráneos	1/3	1/3	1/2	1	3	3	3
Edafología	1/5	1/5	1/3	1/3	1	2	2
Uso de suelo	1/5	1/5	1/3	1/3	1/2	1	1/3
Erodabilidad	1/5	1/5	1/3	1/3	1/2	3	1
Suma	2.60	5.27	8.50	10.00	18.00	22.00	19.33

Tabla 4: Matriz normalizada y de pesos con vectores propios

	Vegetación	Pendiente	Escurremientos superficiales	Escurremientos subterráneos	Edafología	Uso de suelo	Erodabilidad	Criterio de peso	Influencia (%)
Vegetación	0.38	0.57	0.35	0.30	0.28	0.23	0.26	0.34	34
Pendiente	0.13	0.19	0.35	0.30	0.28	0.23	0.26	0.25	25
Escurremientos superficiales	0.13	0.06	0.12	0.20	0.17	0.14	0.16	0.14	14
Escurremientos subterráneos	0.13	0.06	0.06	0.10	0.17	0.14	0.16	0.11	11
Edafología	0.08	0.04	0.04	0.03	0.06	0.09	0.10	0.06	6
Uso de suelo	0.08	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	4
Erodabilidad	0.08	0.04	0.04	0.03	0.03	0.14	0.05	0.06	6
Suma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100

3. Resultados y discusión

Los resultados, que se aprecian en la Figura 9, indican que, gran parte de las zonas que tienen una aptitud territorial intrínseca para la conservación, tienen una huella antrópica, por lo que las principales causas de afectación de la pérdida y fragmentación de la cobertura vegetal es el cambio de uso de suelo forestal a urbano o agrícola, como se aprecia en la Figura 6 (INEGI, 2015). Esto implica una menor conectividad que puede provocar aislamiento y pérdida de ecosistemas (Dramstad et al., 1996), alteración en los flujos hídricos que pueden provocar erosión, e inundaciones en los valles (Fang et al., 2022), además de que la impermeabilización del suelo, por la falta de espacios abiertos dedicados a áreas verdes, ha generado problemas como la contaminación y agotamiento del agua subterránea, que puede conllevar, en muchos casos, a hundimientos del terreno (Muenratch et al., 2022).

Asimismo, estos resultados muestran los rangos de valores para la protección ambiental divididos en cinco, del más alto al más bajo. Las zonas con valor muy alto y alto coinciden con los actuales usos de suelo forestales y los ecosistemas existentes (INEGI, 2015) tanto de vegetación primaria, como de vegetación secundaria, que se presentaron en las Figuras 2 y 6. Es así que, la preservación de los ecosistemas debería ser un factor importante para cualquier proyecto de conservación y desarrollo, debido a que son estructuras únicas que protegen acuíferos, conectan sistemas de corrientes fluviales, mantienen la supervivencia de muchas especies al interior del ecosistema y proveen hábitat y refugio para especies animales (Dramstad et al., 1996), por lo que cumplen con todos los procesos ecológicos. Sin embargo, la conservación de la biodiversidad puede ser muy difícil de justificar, ya que las estrategias tradicionales de conservación, como el establecimiento de áreas protegidas, generan costos altos y nula oportunidad para su aprovechamiento por parte de las comunidades locales, además de que carecen de fondos sostenibles para su gestión,

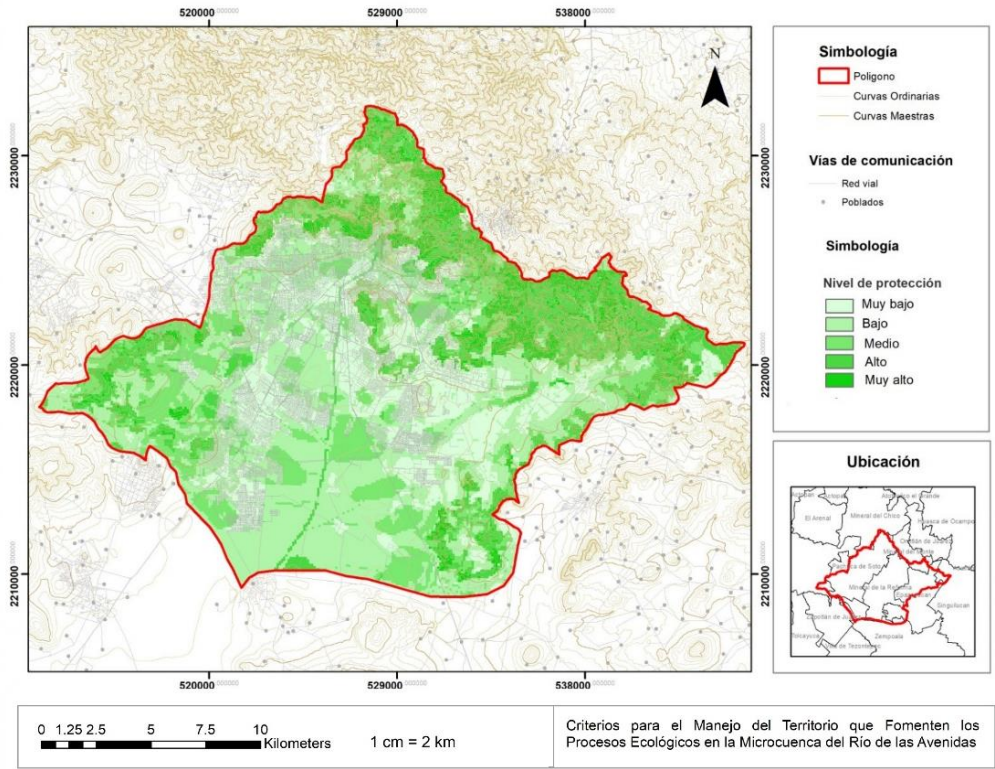


Figura 9: Elaboración propia con base en el análisis realizado.

protección e integridad (Cimon Morin et al., 2013). Por lo que, un enfoque de pagos por servicios ecosistémicos pudiera ser una opción en la que los propietarios de tierras o comunidades en, o cercanas a las zonas de conservación, reciban recompensas financieras por producir, proteger o restaurar los ecosistemas (Engel et al., 2008), basado este enfoque en el principio de que la biodiversidad debe autofinanciarse, generando beneficios económicos como el ecoturismo, que muestra un gran potencial para salvaguardar las zonas forestales mediante la creación de ingresos y oportunidades de empleo local (Naidoo y Ricketts, 2006). Dentro de la poligonal se pueden promover zonas recreativas pasivas, sobre todo en los lugares con pendientes menores a 30°, como se muestra en a Figura 5, evitando los peligros por erosión y derrumbes, que son zonas que, por su peligro intrínseco, pudieran dejarse como áreas protegidas (Urta Matus y Jurio, 2012).

Los rangos medios coinciden, sobre todo, con usos rurales y zonas agrícolas, como se muestra en la Figura 6, pero también con zonas urbanas y carreteras expuestas al peligro por inundación, como se nota en la Figura 3, además del sistema de corrientes fluviales. En cuanto a la situación rural y agrícola, son por lo regular terrenos cercanos a las zonas de conservación y, aunque cumplen de cierta forma con algunos procesos ecológicos como, el ciclo de los nutrientes, y el ciclo del agua (Altieri, 1999), por otro lado, son sistemas que comprometen a la biodiversidad debido a que, por lo regular, son monocultivos homogéneos que utilizan los recursos de manera ineficiente, son altamente dependientes de la energía fósil, imprimen una huella ecológica inmensa, son susceptibles a plagas y también son vulnerables a la variabilidad climática (Thiessen Martens et al., 2015). Es así que, una alternativa pudiera ser, la conversión de los monocultivos a sistemas agrícolas diversificados de bajos insumos externos (Lamine y Bellon, 2009), sin embargo, debe ser una conversión lenta teniendo tiempo para adquirir experiencia con un sistema de cultivo más diverso. En este sentido, una comunidad de organismos se torna compleja cuando se incorporan diferentes tipos de vegetación, que conduce a la interacción entre los componentes de la biodiversidad arriba y abajo del suelo, promoviendo procesos ecológicos; además se debe experimentar a pequeña escala, reduciendo así los riesgos con el fin de aprender a ser lo suficientemente flexibles para adaptarse a las condiciones cambiantes del contexto (Nicholls et al., 2015). Por lo que, los sistemas diversos fomentan redes tróficas complejas, creando conexiones e interacciones entre sus miembros, desarrollando rutas alternativas para el flujo de energía y materia, por lo tanto, una red compleja fomenta una producción más estable y con menos vulnerabilidad ante las enfermedades (Power y Flecker, 1996). Además, los suelos agrícolas cercanos a las zonas de conservación, pueden desarrollar vegetación asociada a los propios ecosistemas, como los distintos tipos de maguey, que son característicos del matorral xerófilo que se encuentra en la poligonal de estudio (INEGI, 2015).

Por otro lado, el sistema de corrientes fluviales y las zonas de inundación son importantes para la conservación, debido a que los escurrimientos pueden actuar como corredores ecológicos, que fomentan el hábitat de especies vegetales y animales, actúan como corredores que impulsan el movimiento de los animales, son filtros de contaminación, protección contra sustancias disueltas, actúan como barreras contra los procesos de erosión, promueven el control hídrico y generan

recursos bióticos y abióticos a lo largo del corredor (Dramstad et al., 1996). Este tipo de elementos pueden ser aprovechados como corredores azules en las zonas agrícolas, que pueden funcionar incrementando la eficiencia del uso del agua, la restauración biofísica de las llanuras de inundación, implementación de las medidas naturales de retención del agua y generación de corredores para el desplazamiento de especies, además de contribuir a la adaptación frente a los impactos del cambio climático (Mas et al., 2018). Por otra parte, en las zonas urbanas, donde los corredores están por lo regular, fragmentados y altamente perturbados, las estrategias defensivas mencionadas, pueden ser ineficaces, por lo que se deben buscar elementos o configuraciones singulares que representen oportunidades especiales para la planificación de los corredores verdes y azules, como el uso de vías férreas abandonadas o de canales y drenes pluviales o espacios abandonados, que pueden ser estrategias donde se implica reconocer las oportunidades que ofrece el entorno e integrarlas al proceso de planificación (Ahern, 1995). Además de que estos lugares, pueden funcionar como elementos asociados a la regulación del impacto de eventos meteorológicos, como jardines de lluvia, zanjas y terrazas de infiltración en ladera, pavimentos permeables, y soluciones en infraestructura como las de retención-detención, complementadas con pozos de absorción que son efectivas y rápidas de construir (Hipólito Jiménez et al., 2024).

Por último, los rangos bajos y muy bajos, coinciden con los usos antrópicos del suelo, que son la agricultura, que, como ya se mencionó, se pudiera iniciar una conversión a sistemas agrícolas diversificados (Lamine y Bellon, 2009), y en mayor medida, la urbanización, donde se ha ocasionado un fuerte deterioro a los ecosistemas, disminuyendo ampliamente su capacidad de cumplir con los procesos ecológicos, ya que, principalmente los cambios en el suelo como, su impermeabilización y mezcla con materiales de relleno que tienden a alcalinizarlo, contaminarlo con metales pesados y derivados del petróleo, además de que esto favorece su compactación, por lo que se limita la aireación, el drenaje y el almacenamiento de la humedad (Cram et al., 2008). Es así que, para comenzar a combatir estos cambios, la Organización Mundial de la Salud, recomienda que las ciudades proporcionen 9m² de espacio par áreas verdes por habitante, además de que aconseja el diseño de redes verdes de tal manera que todos los habitantes de la ciudad vivan cerca de un espacio abierto, con una distancia de no más de 15 minutos a pie (Sorensen et al., 1998); además de que el diseño de los espacios abiertos debe ser con un enfoque ecológico, que conlleve a una proximidad a su concepción a lo que son los hábitats naturales o seminaturales, reconoce la importancia de los procesos dinámicos, como la sucesión ecológica y el mayor uso de plantas autóctonas o adaptadas a las condiciones edafoclimáticas locales, que implicaría una diferencia sustancial en el mantenimiento posterior del espacio (Alonso Martínez, 2015).

Por otra parte, los resultados resaltan que, el valor con más influencia es la vegetación con un 34%, debido a que los ecosistemas realizan las funciones de regulación, hábitat, sustrato, producción e información, de los cuales se desprenden bienes y servicios para las poblaciones humanas (Cornejo Latorre et al., 2014). Es así que los ecosistemas prestan bienes y servicios ambientales para el bienestar de la sociedad y ésta tiene una relación de acentuada dependencia

respecto a algunos de estos ecosistemas que adquieren un carácter estratégico, en la medida que sin ellos, pierden viabilidad procesos vitales o productivos, se incrementan los riesgos o se tornan críticas las relaciones entre comunidades (Márquez, 1997).

El segundo factor con más influencia son las pendientes, con un 25%, tomando en cuenta principalmente a las pendientes mayores para su conservación, esto debido a que, cuanto más abrupta la pendiente, menos estable es, aunado a que la vegetación le da sustento al suelo a través de las raíces evitando la susceptibilidad al intemperismo (Urra Matus y Jurio, 2012). Es así que la cobertura vegetal en pendientes abruptas condiciona una disminución exponencial de la tasa de erosión, por lo que los cambios en la cobertura y uso de suelo han conducido a drásticos incrementos en la erosión del suelo y los consecuentes riesgos que atrae (Nájera González et al., 2016). Por consiguiente, al conservar la vegetación en áreas de riesgo, se mejoraría el funcionamiento del paisaje ya que la vegetación actúa como amortiguador para regular los flujos naturales, lo que podría disminuir los riesgos al estabilizar los suelos, reducir la cantidad de la escorrentía pluvial, evitar inundaciones en las partes bajas, deslaves y aumentar la infiltración del agua (Ochoa González y Ojeda Revah, 2017).

Los siguientes factores con más influencia son los escurrimientos superficiales con un 14% y subterráneos con un 12%, debido principalmente a que si se les quita la capa vegetal debido a los cambios de uso de suelo, se hacen más susceptibles a procesos de erosión que favorecen la pérdida de biodiversidad y la alteración del régimen hidrológico, que provoca una modificación en el funcionamiento de los ecosistemas, favoreciendo pérdidas del suelo por arrastre, y la intensificación de los volúmenes de escurrimiento, provocando inundaciones y daños (Martínez Sifuentes et al., 2020). Es así que los cambios de uso de suelo y la pérdida de la cobertura vegetal provocan un aumento de los flujos hídricos debido a que se reduce la infiltración, además de que la producción de agua superficial y la recarga de los acuíferos son los Servicios Ecosistémicos Hídricos que sufren mayores impactos por los cambios en la cobertura vegetal (Arellano Monterrosas y Ruíz Meza, 2018). Por lo que actualmente, los Servicios Ecosistémicos Hídricos que las cuencas de México proveen, como los asociados a la regulación del impacto de eventos meteorológicos extremos, están declinando a tasas aceleradas, por lo que se deben de regular debido a que son fundamentales para un gran número de pobladores (Balvanera y Cotler, 2007).

En cuanto a la edafología, que tiene una influencia del 6%, se percibe que el uso de suelo más fértil es el phaeozem, además de cambisol y vertisol, que también son suelos bastante fértiles, pero que por otra parte, son muy aptos para fines productivos como la agricultura (INEGI, 2011), es así que la mayor parte de la poligonal con estos suelos es aprovechada para fines agrícolas que, en muchas de las ocasiones comprometen la biodiversidad, utilizan recursos de manera ineficiente, son altamente dependientes de la energía fósil, imprimen su huella ecológica inmensa, son susceptibles a plagas y también son vulnerables a la variabilidad climática (Martens et al., 2015). Por lo que los sistemas agrícolas diversificados, como ya se mencionó, pueden ser una opción, ya que presentan sustancialmente mayor biodiversidad, mejor calidad del suelo y mayor capacidad de retención de agua,

además de una mayor eficiencia energética y una mayor resiliencia al cambio climático (Nicholls et al., 2015).

Respecto a la erodabilidad, que cuenta con una influencia del 6%, se denota que existe mucho impacto sobre el suelo, sobre todo en las zonas bajas donde la aptitud del suelo es predominantemente agrícola. La erosión de los suelos ocasiona la disminución en el contenido de carbono orgánico, que afecta el nivel nutricional de los suelos, su tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua, ocasionando una disminución en su productividad e incremento en la vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos (Olson et al., 2016). Por otra parte, la erosión es percibida por el sector agrícola como un problema a la pérdida de fertilidad en los suelos para la realización de las actividades agropecuarias, por lo que el fortalecimiento de la seguridad alimentaria requiere una agricultura sostenible basada en el control de erosión de los suelos (Cotler et al., 2020). En las zonas altas de la poligonal se debe evitar el cambio de uso de suelo y la deforestación debido a que pueden ocasionar incrementos en la erosión del suelo y los consecuentes riesgos que atrae (Nájera González et al., 2016).

Se aprecia además que, para el uso de suelo, con un 4% de influencia, uso urbano ocupa el 40% de la poligonal, el agrícola el 30% y el forestal solamente ocupa el 30%. Por lo que para contrarrestar los efectos adversos de la urbanización y garantizar que la expansión urbana se produzca de forma sostenible, es necesario contar con ciertas medidas ecológicas en la planificación urbana, como la creación de conectividades mediante corredores y vías verdes para la conservación de la fauna (Niemelä, 1999). Además, como ya se apuntó, puede ser buena opción para las zonas agrícolas, los sistemas diversificados que no comprometan a la biodiversidad y generen una mayor cantidad de procesos ecológicos que los actuales sistemas (Nicholls et al., 2015).

Por último, en las últimas décadas, el marco de gobernanza actual en México se ha robustecido, desde que la preocupación ambiental ha sido incorporada en la política nacional, por lo que los esfuerzos se han dedicado a la conservación y el uso sustentable de los ecosistemas (Carabias et al., 2007). Sin embargo, la demanda de recursos naturales que implica el crecimiento demográfico, las emisiones nocivas al ambiente, en agua, aire y suelos por parte de las áreas urbanas e industriales, y una persistente explotación de los recursos naturales por parte de la población rural, es lo que se vive en México actualmente (Pérez Calderón, 2010). Por lo que, el deterioro ambiental pudiera explicarse por la ausencia de la creación de instituciones que promuevan y faciliten la interacción de sus diferentes actores, además de la poca confianza entre las instituciones gubernamentales, así como la poca flexibilidad, debido a los sistemas jerárquicos centralizados que excluyen a actores no gubernamentales, impidiendo la creación de capital social (Casiano Flores y de Boer, 2015). Es así que, aunque exista un marco fuerte normativo, es necesario involucrar a los ciudadanos, el sector privado y la sociedad civil en el proceso de gobernanza.

4. Conclusiones

La urbanización es una amenaza para muchos hábitats y especies naturales, por lo que es imperante en los estudios de los Programas Municipales de Desarrollo Urbano una visión integral sobre la comprensión del funcionamiento del territorio

que lleve a vislumbrar el comportamiento específico del espacio y permita contar con una base fundamentada para la toma de decisiones.

En este sentido, el análisis de la aptitud del suelo provee la información necesaria para conocer las vocaciones reales naturales del territorio, en función de estas cualidades, es posible establecer la selección priorizada de usos para un espacio que promueva las acciones a tomar en cuanto a la aptitud de conservación del territorio.

Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta importante para la investigación de los patrones espaciales de protección ambiental para la conservación y la identificación de las relaciones entre los factores que contribuyen a ésta aptitud territorial.

El estudio de la aptitud territorial debe ser con principios de criterio múltiple, ya que el análisis de solamente uno o dos factores que influyen en el espacio, puede no ser suficiente para la correcta interpretación y la posterior toma de decisiones en el territorio.

La preservación de los ecosistemas no solamente depende de proteger las áreas existentes en buenas condiciones, sino de un sistema integrado que incluya acciones en la urbanización, como corredores verdes y azules, además de la agricultura que tiene que hacer una conversión a los sistemas agrícolas diversificados, que puedan potencializar los procesos ecológicos encaminados a la sostenibilidad del territorio y un sistema de gobernanza, que involucre a todos los actores, además de que provea de un enfoque integral que permita el autofinanciamiento en la protección de los ecosistemas.

Los resultados muestran las áreas que deben de ser prioridad para la conservación a través de las buenas prácticas en los diferentes usos de suelo que tiene la poligonal, para que el gobierno establezca las políticas públicas pertinentes encaminadas al desarrollo sostenible y los tomadores de decisiones puedan comprometerse con proyectos estratégicos que mitiguen el impacto de la urbanización.

Algunas estrategias propuestas pueden tener una consecuencia positiva de manera inmediata, como el uso de corredores verdes y azules de los espacios e infraestructura subutilizada; otras estrategias son a mediano plazo, que implicarían menos inundaciones en zonas urbanas, por lo que disminuirían los daños a las viviendas y la infraestructura y una mayor recarga y disponibilidad de agua potable. Algunas otras, requieren de una visión a largo plazo que conllevaría a la mejora de los microclimas urbanos, beneficios por los procesos ecológicos como la polinización y un aprovechamiento integral del suelo con agricultura menos agresiva.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Pachuca, en específico a Aurora Villedas Nicolás y Jaquelyn Alejandra Castel Reyes del equipo técnico, que nos apoyaron en la elaboración de las matrices. Además, al Grupo de Investigación en Arquitectura y Estudios Urbanos, de la UAEH, específicamente a Yoan Saidt Beltrán Martínez y Continente Elizalde Domínguez quienes han estado presentes para el apoyo en el análisis del territorio.

Referencias

- Ahern, J. (1995). Greenways as a planning strategy. *Landscape and Urban Planning*, 33(1-3), 131-155. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)02039-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)02039-V)
- Alonso Martínez, M. P. (2015). *Diseño de áreas verdes con criterios ecológicos*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Altieri, M. A. (1999). *AGROECOLOGIA. Bases Científicas para una agricultura sustentable*. Montevideo: Nordan-Comunidad.
- Arellano Monterosas, J. L., y Ruíz Meza, L. E. (2018). Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*(95). <https://doi.org/https://doi.org/10.14350/ig.59467>
- Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas. *Gaceta ecológica* (84-85), 117-123.
- Bennet, A. F., Halsem, A., Cheal, D. C., Clarke, M. F., Jones, R. N., Koehn, J. D., . . . Yen, A. L. (2009). Ecological processes: A key element in strategies for nature conservation. *Ecological Management & Restoration*, 10(3), 192-199. <https://doi.org/10.1111/j.1442-8903.2009.00489.x>
- Bocco, G., Priego, Á., y Cotler, H. (2005). La geografía física y el ordenamiento ecológico del territorio. Experiencias en México. *Gaceta Ecológica* (76), 23-34.
- Bollo Manent, M., Heernández Santana, J. R., y Méndez Linares, A. P. (2010). Evaluación de Potencialidades Naturales en el Ordenamiento Ecológico Territorial: Noreste del Estado de Chiapas, México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (53), 191-218.
- Camps Arbustain, M., Madinabeitia, Z., Anza Hortalà, M., Macías García, F., Virgel, S., y Macías, F. (2008). Extractability and leachability of heavy metals in Technosols prepared from mixtures of unconsolidated wastes. *Waste Management*, 28(12), 2653-2666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.008>
- Carabias, J., Arriaga, V., y Cervantes Gutiérrez, V. (2007). Las políticas públicas de la restauración ambiental en México, limitantes, avances, rezagos y retos. *Boletín de la Sociedad Botánica de México, Suplemento* (80), 85-100.
- Casiano Flores, C., y de Boer, C. (2015). Symbolic implementation: Governance assessment of the water treatment plant policy in the Puebla's Alto Atoyac sub-basin, Mexico. *International Journal of Water Governance* (4), 1-24. <https://doi.org/DOI: 10.7564/14-IJWG79>
- Cimon Morin, J., Darveau, M., y Poulin, M. (2013). Fostering synergies between ecosystem services and biodiversity in conservation planning: A review. *Biological Conservation*, 166, 144-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.06.023>
- Contreras López, C. (2016). *Oblitopías: recuperación del espacio abierto contaminado en asentamientos humanos ubicados sobre depósitos de jales mineros*. México: Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Contreras López, C., Pérez Herrera, L. R., y Rodríguez Ruíz, J. (2023). Primeras aproximaciones a los potenciales usos de suelo para la conurbación de Mixquiahuala y Progreso Hidalgo, mediante un análisis ambiental. *Diseño en Síntesis* (70), 52-67.
- Cornejo Latorre, C., Calderón Patrón, J. M., y Suárez Ramírez, L. (2014). Los servicios ambientales y la biodiversidad. *Investigación ambiental*, 6(1), 53-60.
- Cotler, H., Corona, J. A., y Galeana Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones geográficas* (101). <https://doi.org/https://doi.org/10.14350/ig.59976>
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I., y Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (66), 81-104.
- Cruz Ortiz, N. L., Torres García, J. J., y Caledrón Rosas, N. C. (2020). Análisis Multicriterio como Herramienta para la Toma de Decisiones en las Ciencias de la Tierra. En C. E. Solano Sosa, M. E. Sánchez Morales, G. V. Vázquez García, A. Martínez García, y E. L. Ramos Guerrero, *Miscelánea Científica de México Tomo IV: Físico Matemáticas y Ciencias de la Tierra* (pp. 177-186). Lagos de Moreno: Temacilli.
- Dramstad, W. E., Olson, J. D., y Forman, R. T. (1996). *Landscape Ecology Principles in Landscape Architecture and Land-Use Planning*.

- Washington: Island Press and American Society of Landscape Architects.
- Engel, S., Pagiola, S., y Wunder, S. (2008). Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. *Ecological Economics*, 65(4), 663-674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.011>
- Etchevers, J. D., Hidalgo, C., y Paz, F. (2019). Degradación de Suelos y Necesidad de Políticas Públicas. *Elementos para Políticas Públicas*, 3(3), 267-273.
- Fang, L., Huang, J., Cai, J., y Nitivattananon, V. (2022). Hybrid approach for flood susceptibility assessment in a flood-prone mountainous catchment in China. *Journal of Hydrology*, 612(Part A). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128091>
- Farrel Baril, C., Turpin Marion, S., y Suppen Reynaga, N. (2013). Huella de agua de uso público-urbano en México. *Realidad, Datos y Espacio, Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1, 58-71.
- Hipólito Jiménez, U., Navarro Gómez, H. I., Cerón Carballo, J. E., Contreras López, C., Flores Badillo, J., y Lozano Hernández, J. A. (2024). Gestión del agua pluvial mediante sistemas de retención-detención para la zona de Tulancingo Hidalgo. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(Especial 3), 181-190. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13441>
- INEGI. (1981). *Hidrología*. Retrieved 2025, from Geografía y Medio Ambiente: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/#descargas>
- INEGI. (1989). *Guía para la Interpretación Cartográfica. Hidrología*. Retrieved 2025, from Publicaciones INEGI: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/guia_hidrologia/702825007019.pdf
- INEGI. (2000). *Modelos Digitales de Elevación. Pachuca de Soto y Ciudad de México*. [www.inegi.org.mx](https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#mapas): <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#mapas>
- INEGI. (2011). *Guía de Interpretación Cartográfica Edafología Escala 1:250,000 serie II* (1 ed.). México: Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI. (2013). Carta edafológica serie II Pachuca de Soto F 14-11. México: Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI. (2015). Carta de Uso de Suelo y Vegetación 1: 250:000 Serie V Pachuca de Soto F14-11. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2017). *Guía para la Interpretación Cartográfica Uso de Suelo y Vegetación* (1 ed.). México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2021). *TOPOGRAFÍA*. INEGI: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/#descargas>
- Lamine, C., y Bellon, S. (2009). Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 97-112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/agro:2008007>
- López de Juambelz, R. (2012). Análisis Ambiental, herramienta de diseño para la intervención del paisaje a escala regional. En *Arquitectura de Paisaje, obras proyectos y reflexiones*. Compiladores Mazari, M; Wiener, G. Colección de textos FA. Facultad de Arquitectura UNAM.
- Márquez, G. (1997). Ecosistemas como factores de bienestar y desarrollo. *Ensayos de economía*, 7(13), 113-141.
- Martens, J. T., Entz, M. H., y Wonnek, M. D. (2015). Review: Redesigning Canadian prairie cropping systems for profitability, sustainability, and resilience. *Canadian Journal of Plant Science*, 95(6), 1049-1072. <https://doi.org/https://doi.org/10.4141/cjps-2014-173>
- Martínez Sifuentes, A. R., Villanueva Díaz, J., Estrada Ávalos, J., Vázquez Vázquez, C., y Orona Castillo, I. (2020). Pérdida de suelo y modificación de escurrimientos causados por el cambio de uso de la tierra en la cuenca del río Conchos, Chihuahua. *Novo scientia*, 12(25). <https://doi.org/https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2321>
- Mas, F. M., Cortés Sánchez, F. M., y Molina Martín, B. (2018). Infraestructuras verdes y azules: estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático. *Cambio climático y sostenibilidad*(191), 105-112.
- Muenrath, P., Nguyen, T. P., Shrestha, S., Chatterjee, J. S., y Virdis, S. G. (2022). Governance and policy responses to anthropogenic and climate pressures on groundwater resources in the Greater Mekong Subregion urbanizing cities. *Groundwater for Sustainable Development*, 18, 100791. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100791>
- Naidoo, R., y Ricketts, T. H. (2006). Mapping the Economic Costs and Benefits of Conservation. *PLOS Biology*, 4(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040360>
- Nájera González, O., Bojórquez Serrano, J. I., Flores Vilchez, F., Murray Núñez, R. M., y González García-Sáncho, 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>
- Nicholls, C. I., Altieri, M. A., y Vázquez, L. L. (2015). Agroecología: Principios para la Conservación y el Rediseño de Ecosistemas Agrícolas. *Agroecología*, 10(1), 61-72.
- Niemelä, J. (1999). Ecology and urban planning. *Biodiversity and Conservation*, 8, 119-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1008817325994>
- Ochoa González, Y., y Ojeda Revah, L. (2017). Conservación de vegetación para reducir riesgos hidrometeorológicos en una metrópoli fronteriza. *Estudios fronterizos*, 17(34), 47-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.21670/ref.2017.35.a03>
- Olson, K. R., Al-Kaisi, M., Lal, R., y Cihacek, L. (2016). Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(3), 61A-67A. <https://doi.org/https://doi.org/10.2489/jswc.71.3.61A>
- Ortega, Z., Arrondo, E., y Pérez García, J. M. (2023). Ecología del Movimiento: del análisis individual a la provisión de servicios ecosistémicos. *Ecosistemas*, 32(2), 2608. <https://doi.org/https://doi.org/10.7818/ECOS.2608>
- Pablo Pablo, M. A., y Hernández Santana, J. R. (2016). Evaluación de la aptitud natural de los paisajes físico-geográficos en la cuenca del río Grande, Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(91), 7-24. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.49203>
- Pérez Calderón, J. (2010). La política ambiental en México: gestión e instrumentos económicos. *El Cotidiano*(162), 91-97.
- Power, A. G., y Flecker, A. S. (1996). The Role of Biodiversity in Tropical Managed Ecosystems. En G. H. Orians, R. Dirzo, y J. H. Cushman, *Biodiversity and Ecosystem Processes in Tropical Forests* (pp. 173-194). Berlín: Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-79755-2_9
- Rosete Vergés, F. A., Pérez Damián, J. L., Villalobos Delgado, M., Navarro Salas, E. N., Salinas Chávez, E., y Remond Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21-35.
- Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process - What it is and How to Use. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Salazar Marcial, L. (2021). Los Procesos Ecológicos en los Agrosistemas y las Interacciones Bióticas. *Boletín del SCME*, 10-13.
- Siebe, C., Bocco, G., Sánchez, J., y Velázquez, A. (2003). Suelos: distribución, características y potencial de uso. En A. Velázquez, A. Torres, y G. Bocco, *Las Enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales* (pp. 127-163). INE-SEMARNAT.
- Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K. J., y Williams, J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. Washington, D.C.: Inter-american Development Bank.
- Thiessen Martens, J. R., Entz, M. H., y Wonnek, M. D. (2015). Review: Redesigning Canadian prairie cropping systems for profitability, sustainability, and resilience. *Canadian Journal of Plant Science*, 95(6), 1049-1283. <https://doi.org/https://doi.org/10.4141/cjps-2014-173>
- Urra Matus, C. S., y Jurio, E. M. (2012). Desestabilización de Laderas y Peligro de Procesos de Remoción de Masa. Caso de Estudio: Faldeos de Cerro Curruhuica. San Martín de los Andes. Neuquén. *Boletín Geográfico*(34), 77-89.
- Villegas Martínez, D. (2021). Determinación del uso potencial del suelo a partir de la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales de un área de protección ambiental ubicada en la Región Centro-Sur de México. *Acta Universitaria*, 31, 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.15174/au.2021.3049>

