



# Aplicación del Índice de Perturbación del Karst como estrategia de geoconservación en el Geoparque Mundial de la UNESCO Mixteca Alta (Méjico)

José Luis Sánchez-Cortez <sup>a</sup>, Norma López-Castañeda <sup>a</sup>, Kathleen Vélez-Macías <sup>b</sup> & Oscar Bernardo Ortega-Díaz <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Unidad Académica de Estudios Territoriales Oaxaca, Instituto de Geografía, UNAM. Oaxaca, México. [jossancor@gmail.com](mailto:jossancor@gmail.com), [jsanchez@geografia.unam.mx](mailto:jsanchez@geografia.unam.mx), [normalc@geografia.unam.mx](mailto:normalc@geografia.unam.mx)

<sup>b</sup> Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México. [kathleen\\_311297@hotmail.com](mailto:kathleen_311297@hotmail.com)

<sup>c</sup> Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta. Yanhuitlán, Oaxaca, México. [berort.medios@gmail.com](mailto:berort.medios@gmail.com)

Recibido: 28 mayo 2025. Recibido en formato revisado: 17 julio 2025. Aceptado: 18 julio 2025.

## Resumen

Los sistemas Kársticos ofrecen valiosos servicios ambientales, resultado de la interacción de variados procesos geológicos y fisicoquímicos que les dan origen y estructura. Además de su valor geológico, los sistemas Kársticos ofrecen recursos con aplicaciones en turismo, agricultura, abastecimiento de agua, conservación biológica y patrimonio cultural. Sin embargo, la presión antropogénica y el uso intensivo de estos espacios generan impactos que comprometen su conservación. En este ámbito, el presente estudio es el resultado de una evaluación sistemática del estado de conservación de los sistemas kársticos del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMUMA), utilizando el Índice de Perturbación del Karst como herramienta de evaluación cualitativa, ya que se consideró un método afín a los objetivos de la geoconservación como estrategia para la preservación de estos ecosistemas. La aplicación de este índice permitió identificar los factores de presión que actúan sobre el karst y además permitió zonificar las áreas con mayores niveles de perturbación relativa dentro del área de estudio. Los factores de presión fueron relacionados con actividades antrópicas, tales como la agricultura y extracción de agua subterránea, estando presentes justo en los sitios con mayor grado de perturbación. Los resultados obtenidos constituyen una base fundamental para la toma de decisiones en la administración de recursos naturales, el ordenamiento territorial y el desarrollo de actividades sostenibles.

*Palabras clave:* geoconservación; geodiversidad; Índice de Perturbación del Karst; Geoparque Mixteca Alta; México.

# Application of the Karst Disturbance Index as a geoconservation strategy in the Mixteca Alta UNESCO Global Geopark (Mexico)

## Abstract

Karst systems provide valuable environmental services, stemming from the interaction of diverse geological and physicochemical processes that shape and define them. In addition to their geological value, karst systems offer resources with applications in tourism, agriculture, water supply, biological conservation and cultural heritage. However, anthropogenic pressure and intensive use of these spaces generate impacts that compromise their conservation. In this context, the present study is the result of a systematic assessment of the conservation status of the karst systems of the Mixteca Alta UNESCO Global Geopark (GMUMA), using the Karst Disturbance Index as a qualitative evaluation tool, since it was considered to be a method related to the objectives of geoconservation as a strategy for the preservation of these ecosystems. The application of this index made it possible to identify the pressure factors affecting karst systems and also allowed for the zoning of the areas with the highest levels of relative disturbance within the study area. The pressure factors were associated with anthropogenic activities, such as agricultural activities and groundwater extraction, being present precisely in the areas with the highest degree of disturbance. The results obtained constitute a fundamental basis for decision making in natural resource management, land use planning and the development of sustainable activities.

*Keywords:* geoconservation; geodiversity; Karst Disturbance Index; Mixteca Alta Geopark; Mexico.

**How to cite:** Sánchez-Cortez, J.L., López-Castañeda, N., Vélez-Macías, K., y Ortega-Díaz, O.B., (2025). Aplicación del Índice de Perturbación del Karst como estrategia de geoconservación en el Geoparque Mundial de la UNESCO Mixteca Alta (Méjico).. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 58, pp. 28-40. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n58.120636>

## 1 Introducción

En términos generales, el concepto de karst involucra paisajes y ambientes caracterizados por formaciones geológicas únicas, derivados de la disolución de rocas solubles; este proceso da lugar a una gran diversidad de estructuras con distintos tamaños y formas [1-3]. Debido a su composición química y los efectos de disolución, los sistemas kársticos suelen desarrollar cavidades subterráneas, que pueden presentarse como conductos largos y estrechos, muchos de los cuales logran extenderse y formar complejas redes subterráneas de varias decenas de kilómetros. Estas redes pueden incluir diversas estructuras internas (cascadas, pozos, sifones, entre otros) que se conectan entre sí desde un punto de ingreso del agua subterránea hasta múltiples puntos de salida, supeditado a factores físicos y químicos, así como a los diversos gradientes, particulares para cada territorio [4,5].

Los sistemas kársticos ofrecen una amplia variedad de recursos con múltiples aplicaciones, tales como usos turísticos, culturales, energéticos, de saneamiento, e incluso científicas, considerando su alto valor como ecosistemas prístinos y singulares [6]. De entre las cuales, el turismo es una de las principales actividades que se beneficia de los sistemas kársticos, ya que estos paisajes ofrecen entornos que muestran la dinámica de la vida, la conexión entre diversos ecosistemas y la huella de acontecimientos históricos, manifestando procesos de movimiento, flujo e interacción a lo largo del tiempo [7]. Por otro lado, los recursos hídricos subterráneos de ambientes kársticos tienen un importante valor económico y cultural, de hecho, cerca de una cuarta parte de la población mundial obtiene su suministro de agua potable a partir de fuentes kársticas. Así mismo, es conocido que los sistemas kársticos proveen suelos altamente fértils, ideales para la agricultura, tanto convencional como especializada.

Desde una perspectiva biológica, los sistemas kársticos, especialmente las cavernas, representan nichos ecológicos con niveles únicos y excepcionales de biodiversidad animal. Y es que las cuevas y cavernas no solo albergan una gran diversidad de especies, sino que también presentan una variedad de organismos especializados, que se adaptan a las condiciones particulares de estos entornos [8]. Sin embargo, es en las zonas tropicales en donde se destaca la una mayor riqueza de especies y abundancia de organismos en comparación con otras partes del mundo [9]. En este contexto, estas características subrayan la importancia de preservar el karst y sus componentes asociados, que en conjunto integran el amplio dominio de la geodiversidad.

En este contexto, el análisis y la evaluación del estado de conservación de los sistemas kársticos es un tema complejo y de naturaleza multidisciplinaria, que aborda aspectos de preservación de la fauna, los recursos hídricos, el patrimonio cultural, el paisaje y las áreas protegidas, entre otros [10,11]. Dentro de esta variedad de procesos y valoraciones, el uso de índices matriciales para evaluación cualitativa ha demostrado ser una herramienta versátil y eficaz para valorar el estado de conservación del karst, proporcionando una visión integral sobre los procesos que influyen en los elementos kársticos en diversas escalas. La implementación del Índice de Perturbación del Karst, desarrollado por van Beynen y Townsend [12], destaca por su versatilidad y capacidad de adaptación a territorios con diversas condiciones particulares, siendo aplicado en diferentes contextos geográficos [13-15], incluso

en otros territorios que ostentan la denominación de Geoparque [16]. Además, su diseño contempla variables de distintas escalas espaciales, lo que permite su aplicación tanto en áreas extensas como en zonas de menor superficie.

Todos estos conceptos van de la mano con los enfoques aplicados a la geoconservación, la cual se establece como el conjunto de acciones orientadas a la preservación y mejora de los elementos geológicos, geomorfológicos y edáficos, incluyendo la protección de procesos, sitios y especímenes, así como iniciativas de divulgación y concienciación. Aunado a lo antes dicho, la geoconservación abarca el registro y la recuperación de datos o muestras de características y lugares que enfrentan riesgos de deterioro o desaparición [17,18].

Los sistemas kársticos de la Mixteca Alta, ubicados en el estado de Oaxaca, México, están expuestos a múltiples factores de presión, principalmente derivados de prácticas agrícolas intensivas, procesos de erosión acelerada y cambios en el uso del suelo. La interacción entre las condiciones geológicas locales y las actividades humanas ha generado una dinámica compleja que compromete la conservación del geopatrimonio kárstico, haciendo necesaria la implementación de estrategias de monitoreo para su gestión sostenible. Este estudio tiene como finalidad evaluar el estado de conservación de las áreas kársticas localizadas en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMUMA), y desarrollar una zonificación de los espacios con mayor perturbación relativa, identificando los principales factores que ejercen presión sobre los recursos derivados del karst. Todo lo anterior se enmarca en el reconocimiento de que la geoconservación involucra procesos de monitoreo del geopatrimonio [19], y que los Geoparques Mundiales de UNESCO son estrategias que promueven la geoconservación a partir de estrategias innovadoras y participativas.

La información derivada de este trabajo constituye en un valioso insumo para la toma de decisiones, y brinda registros clave para la gestión de recursos, el ordenamiento territorial, la administración hídrica a nivel comunitario, así también contribuye en el desarrollo turístico y la creación de potenciales zonas de conservación.

## 2 Métodos

Entre los principales aspectos metodológicos de este estudio se destaca la aplicación de técnicas de análisis geoespacial y percepción remota para la determinación del área de trabajo (áreas kársticas dentro del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta), combinada con evaluaciones y observaciones *in situ*. Finalmente, se ejecutó una evaluación cuali-cuantitativa, mediante el uso de una matriz estructurada con indicadores específicos para valoración de las áreas kársticas previamente delimitadas; estas valoraciones permitieron establecer zonas con diferentes grados de perturbación. A continuación, se describen de forma detallada los elementos metodológicos fundamentales que sustentan el desarrollo de esta investigación.

### 2.1 Selección y descripción del área de estudio

#### 2.1.1 Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta

El presente trabajo se desarrolló en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, el cual se extiende en una superficie

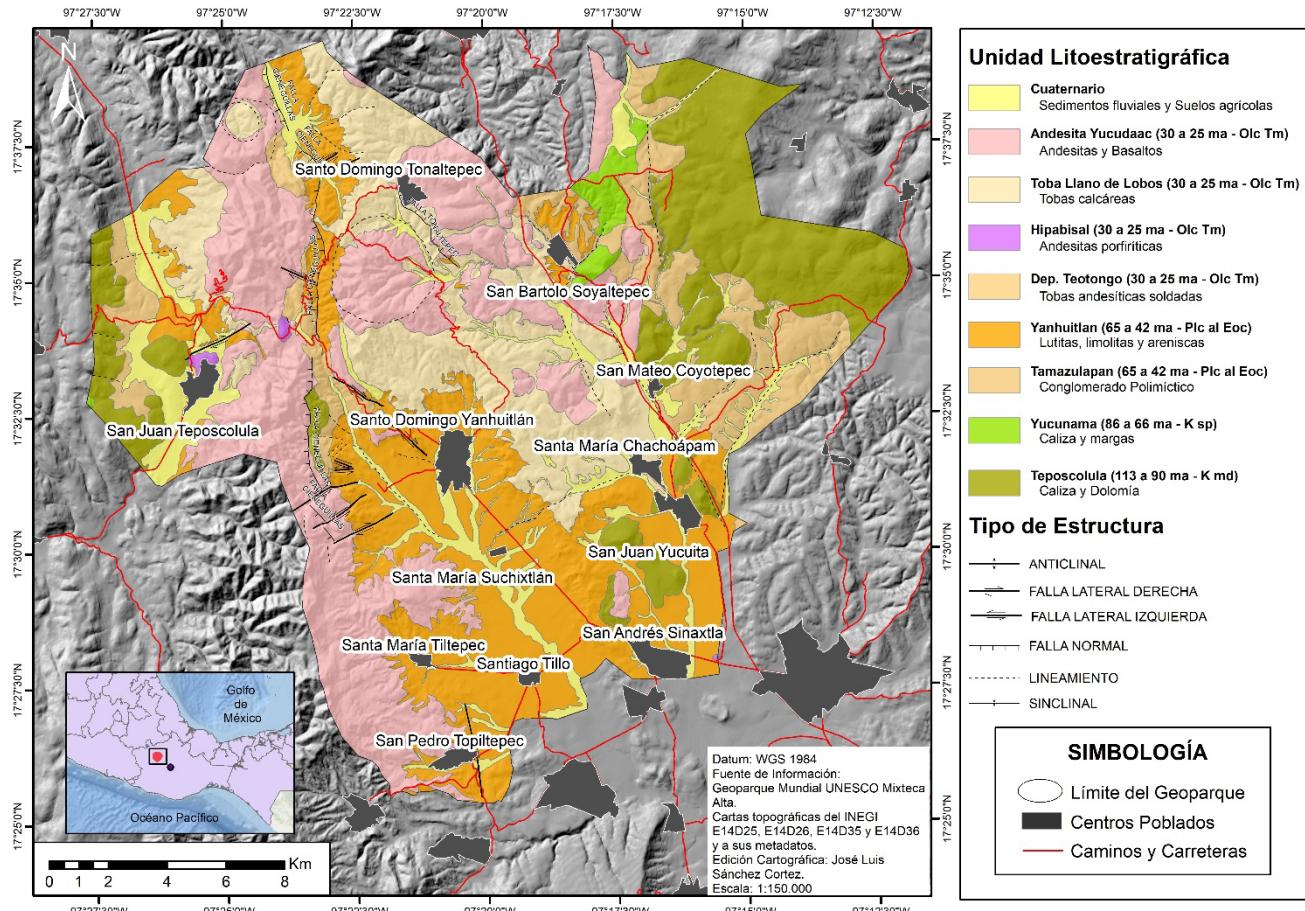


Figura 1. Mapa Geológico del área de estudio: Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta.  
Fuente: Elaborado por los autores.

de 415 km<sup>2</sup>, e involucra un total de nueve municipios, ubicados en la región centro-oeste de la Mixteca Alta, estado de Oaxaca, México [20,21]. Su población aproximada es de 7.000 habitantes, mismos que moran junto a paisajes montañosos con valles y colinas, con altitudes que oscilan entre los 2.050 y 2.890 metros sobre el nivel del mar. El GMUMA se sitúa entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental mexicana, posee una gran riqueza geológica, caracterizada por una variedad de rocas de distintas edades y condiciones, además de estructuras tectónicas tanto locales como regionales. En esta zona afloran formaciones de rocas sedimentarias mesozoicas de la cuenca Tlaxiaco, la cual descansa sobre un antiguo basamento metamórfico del Proterozoico, denominado como Complejo Oaxaqueño (Fig. 1). Dentro de la cuenca Tlaxiaco se encuentran depósitos marinos en plataforma continental, entre ellos la Formación Toposcolula (Albiense-Cenomaniense), seguidos por secuencias de rocas de origen fluvial y continental que datan del Cenozoico [22,23].

#### 2.1.2 Determinación del área kárstica en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta

La delimitación del área kárstica dentro del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMUMA) se llevó a cabo

mediante teledetección, utilizando bandas espectrales para identificar las características mineralógicas de los carbonatos presentes en las rocas calcáreas. Se emplearon dos imágenes satelitales ASTER L1T, ajustadas para minimizar errores topográficos y con 14 bandas espectrales, lo que facilita la discriminación litológica [24,25]. Para garantizar la precisión del análisis, se seleccionaron imágenes satelitales sin nubosidad, tomadas en períodos de baja precipitación con el fin de reducir la interferencia de la vegetación. Dado que el sensor SWIR dejó de funcionar en 2008, se optó por imágenes de marzo de 2005, asegurando que esta elección no comprometiera la exactitud del análisis litológico.

El procesamiento de estas imágenes se realizó mediante el software ENVI 5.3, aplicando una corrección radiométrica a los sensores VNIR y SWIR. Luego, se generó un mosaico a partir de ambas imágenes y se implementó el proceso de apilamiento de capas (layer stacking) en los sensores VNIR y SWIR para realizar la corrección atmosférica con el método Internal Average Relative Reflectance (IAR). Se emplearon máscaras para eliminar elementos ajenos a la identificación litológica, incluyendo sombras, cuerpos de agua y vegetación. Para la eliminación de vegetación en zonas áridas y semiáridas, se utilizó el índice de vegetación ajustado al

suelo (SAVI), optimizando la precisión del estudio [26].

Las bandas espectrales relevantes fueron sometidas a un análisis matemático con el fin de detectar las variables mineralógicas del GMUMA. Se utilizó el índice de calcita (eq. 1) propuesto por Ninomiya [27], el cual es fundamental para identificar zonas con presencia de este mineral, relevante en estudios geológicos y de exploración minera. Este índice permite detectar alteraciones propilíticas vinculadas a la presencia de minerales como clorita, epidota, albita y carbonatos.

$$CI_{SWIR} = (b6 * b9) / (b8 * b8) \quad (1)$$

Tabla 1.  
Sitios de monitoreo para delimitación del área kárstica.

Nº	Sitios	Altitud (msnm)	Litología
1	Montelobos	2.440	Calizas, Formación Teposcolula
2	El Sótano	2.487	Calizas, Formación Teposcolula
3	Yutoto	2.400	Calizas, Formación Teposcolula
4	Resumidero	2.330	Calizas, Formación Teposcolula
5	Teposcolula	2.301	Calizas, Formación Teposcolula
6	Perales	2.452	Calizas, Formación Teposcolula
7	El Arenal	2.471	Andesitas y areniscas calcáreas
8	Montelobos		
9	San Pedro Añafe	2.394	Andesitas
10	Tooxi	3.361	Andesitas
11	Vista Hermosa	2.571	Andesitas
	Cerro Yukunudahui	2.367	Andesitas

Fuente: Elaborado por los autores.

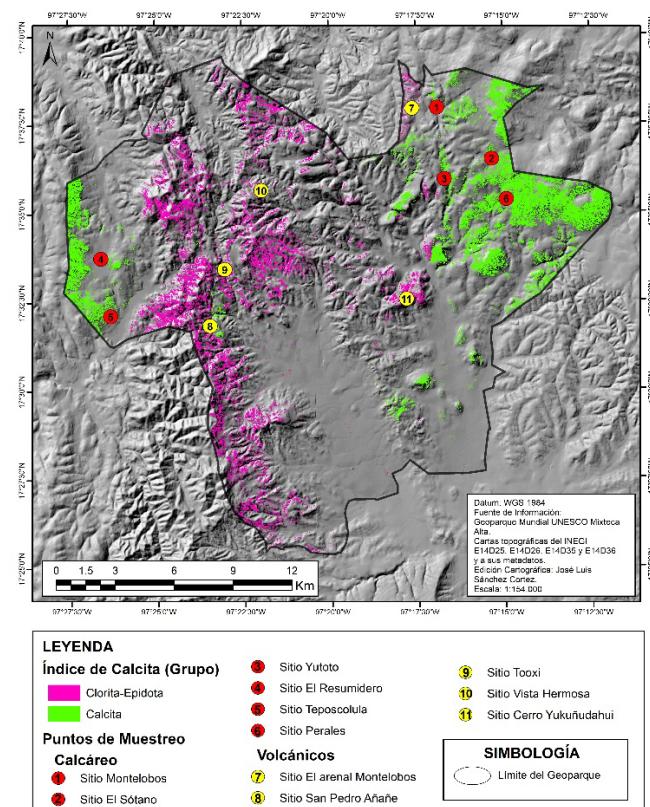


Figura 2. Representación cartográfica de la distribución de las zonas con alteración propilítica en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta.  
Fuente: Elaborado por los autores.

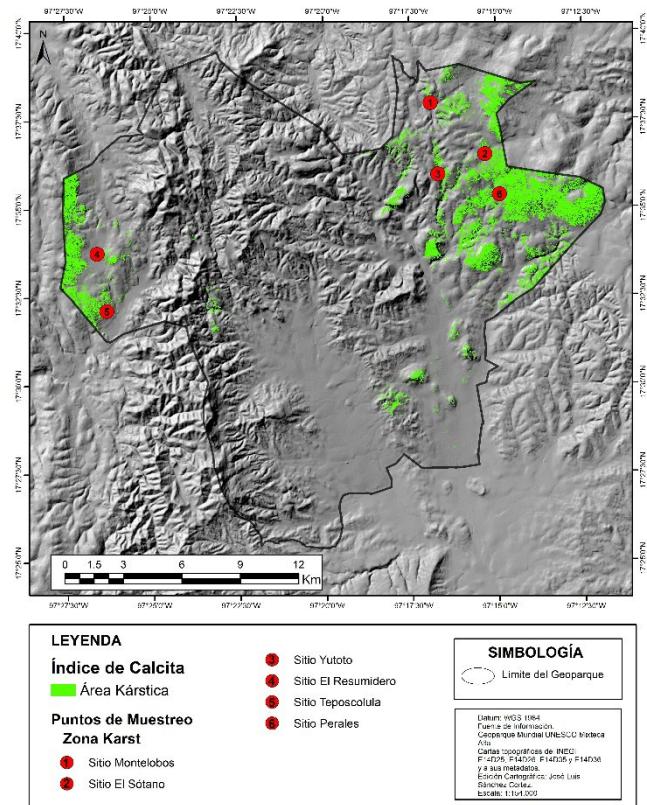


Figura 3. Mapa que muestra la ubicación de los puntos de muestreo, y la delimitación de las zonas kársticas en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta.

Fuente: Elaborado por los autores.

A partir de este análisis, se generó un mapa con la distribución de áreas afectadas por alteración propilítica (Fig. 2), incluyendo carbonatos, clorita, epidota y albita. Para identificar específicamente las zonas con mineralización de carbonatos (potenciales áreas kársticas), se tomó como base el mapa de distribución de alteraciones propilíticas, complementándolo con observaciones macroscópicas de rasgos litológicos y mineralógicos en once puntos de muestreo selectivo (Tabla 1). Además, se contrastó la información con el mapa geológico del Geoparque Mixteca Alta. Finalmente, tras la validación en campo, se obtuvo un mapa definitivo con la distribución de las zonas kársticas (Fig. 3).

## 2.2. Aplicación del Índice de Perturbación del Karst (KDI) y definición del grado de Perturbación y Sensibilidad

Después de definir las áreas kársticas dentro del GMUMA, se llevó a cabo una evaluación in situ del estado de geoconservación de los sistemas kársticos, mediante la aplicación del Índice de Perturbación del Karst (KDI, por sus siglas en inglés). Este índice, desarrollado por van Beynen y Townsend [12], corresponde a una matriz cuali-cuantitativa, compuesta por 30 indicadores, subdividido en cinco categorías: geomorfología, atmósfera, hidrología, biota y cultura (Tabla 2). Su uso ha sido ampliamente aceptado para determinar el grado de afectación y conservación de los sistemas kársticos a nivel municipal, por lo que se consideró pertinente para este estudio.

Tabla 2.

Indicadores de la Matriz del Índice de Perturbación del Karst.

Categoría	Atributo	Indicador
Geomorfología	Formaciones del relieve	Canteras/minería
		Inundación (estructura de superficie construida por el hombre)
		Drenaje de aguas pluviales (%) del total de aguas pluviales canalizadas a sumideros)
		Relleno (%) de cuevas/sumideros llenos)
	Karst subterráneo	Vertidos (%) de sumideros afectados)
		Erosión
Atmósfera	Suelos	Compactación debida al ganado o a las personas
		Inundación (inundación inducida por el hombre debido a la alteración de la superficie)
	Karst subterráneo	Eliminación de decoración - vandalismo
		Mineral - eliminación de sedimentos
		Compactación de sedimentos del suelo - destrucción
		Desecación
Hidroología	Calidad del aire	Corrosión por condensación inducida por el hombre
		Plaguicidas y herbicidas
	Calidad del agua - Prácticas de superficie	Vertidos industriales o de petróleo
		Concentraciones de componentes químicos nocivos en los manantiales
	Cantidad de agua	Cambios en el nivel freático (descenso en metros)
		Cambios en las aguas de goteo de las cuevas
Biota	Perturbación de la vegetación	Eliminación de vegetación (% del total)
		Riqueza de especies (% de disminución)
	Biota subterránea - Cueva	Densidad de población
		Riqueza de especies (% de disminución)
	Subsuelo - Aguas subterráneas	Densidad de población
		Destrucción/eliminación de artefactos históricos (% tomado)
Cultural	Artefactos humanos	Destrucción/eliminación de artefactos históricos (% tomado)
		Protección reglamentaria
	Gestión de la región kárstica	Aplicación de la normativa
		Educación pública
	Construir infraestructuras	Construcción de carreteras
		Construcción sobre elementos kársticos
		Construcción en cuevas

Fuente: van Beynen and Townsend [12].

Tabla 3.

Sitios para el monitoreo del Índice de Perturbación del Karst.

Nº	Sitios	Altitud (m.s.n.m.)	Área (Ha)	Litología
1	Montelobos	2.440	4,3	Calizas
2	El Sótano	2.487	4,59	Calizas
3	Yutoto	2.400	5,3	Calizas
4	Resumidero	2.330	4,88	Calizas
5	Teposcolula	2.301	3,23	Calizas
6	Perales	2.452	4,47	Calizas

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 4.

Estandarización nominal, basada en rangos de afectación y sensibilidad.

Valoración	Afectación	Sensibilidad
0,81 - 1,00	Afectación Crítica	Sensibilidad Crítica
0,71 - 0,80	Afectación Severa	Sensibilidad Severa
0,61 - 0,70	Muy Afectado	Sensibilidad Considerada
0,51 - 0,60	Afectado	Sensible
0,40 - 0,50	Moderada Afectación	Sensibilidad Moderada
0,20 - 0,39	Menor Afectación	Ligeramente Sensible
0,00 - 0,19	Prístico	No Sensible

Fuente: van Beynen and Townsend [12].

Las matrices fueron aplicadas en seis sitios de monitoreo (Tabla 3), los cuales corresponden a las áreas de rocas calizas, ya que este tipo de litología fue el que presentó un mayor grado de morfologías por disolución. Durante la recolección de datos, hubo variables que no aplicaban o no correspondían a las características de los sistemas analizados, en estos casos, dichas variables fueron excluidas del cálculo total del índice (N/A), ajustando el resultado final en consecuencia. Los valores obtenidos se expresan en una escala de 0 a 1, calculada a partir de la proporción entre el valor máximo posible y la unidad. Los resultados derivados del KDI fueron estandarizados mediante rangos de afectación y sensibilidad (Tabla 4), siguiendo las metodologías propuestas [12,28,29]. Finalmente se realizó un mapa de distribución de las perturbaciones del karst en el área de estudio, a partir de los datos obtenidos y sus correlaciones espaciales, mediante interpolación.

### 3 Resultados y discusión

Alrededor del 20% del territorio mexicano está compuesto por rocas solubles, principalmente calizas y, en menor medida, yesos. Sin embargo, tan solo el 12.95% del área kárstica nacional se encuentra bajo alguna categoría de conservación [30]. Estas formaciones calcáreas se encuentran distribuidas principalmente en la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, así como en el Estado de Chiapas, y la península de Yucatán. Las variaciones en la estructura geológica y las condiciones climáticas de estas regiones han dado lugar a una amplia diversidad de formaciones kársticas. Los primeros estudios sobre el karst en México han tenido como principal enfoque la península de Yucatán [31]. Esta distribución de sistemas kársticos a nivel nacional, generan una gran variedad de morfologías y tipologías kársticas (karst tropical, karst alpino, karst de la sierra, entre otros), controladas por el clima, las estructuras geológicas y la litología, dando como resultado una diversidad de ambientes y ecosistemas muy particulares.

Las variables sociales y demográficas a las cuales están expuestos los sistemas kársticos generan impactos ambientales severos y significativos, tanto en el karst como en sus componentes individuales. En el caso del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, la densidad poblacional es bastante baja, considerando que en un área de 415 km<sup>2</sup> habitan cerca de 7.000 personas, generando un rango de 16,87 personas por cada km<sup>2</sup>. Este rango se ubica muy por debajo de la media nacional de densidad poblacional, correspondiente a 64,3 habitantes por km<sup>2</sup>, según el censo de población y vivienda de 2020 [32]. Esta situación influye positivamente en el estatus de conservación de los sitios estudiados. Dada estas condiciones, la aplicación del Índice de Perturbación del Karst (KDI) se vislumbró como una alternativa diagnóstica del estado de conservación de estos

elementos geológicos. Con la aplicación de este índice se obtuvieron resultados conservadores, lo que indica que las áreas analizadas no presentan un deterioro extremo ni una afectación grave. En términos generales, los hallazgos reflejan un karst con afectación menor y sensibilidad leve, (Tablas 5 y 6).

Tabla 5.

Matriz del Índice de Perturbación del Karst, según la metodología de van Beynen and Townsend [12].

Categoría	Atributo	Indicador	Descriptores de las opciones de nivel		Montelobos	El Sótano	Yutoto	Resumidero	Teposcolula	Perales
			Opciones	Nivel						
Formaciones del relieve	Canteras/ minería	Grandes minas a cielo abierto	3							
		Pequeñas minas en explotación	2		0	1	1	0	0	0
		Eliminación del pavimento a pequeña escala	1							
		Ninguno	0							
	Inundación (estructura de superficie construida por el hombre)	Inundación total del valle por presas hidroeléctricas	3							
		Inundación de campos para riego	2		0	0	1	0	0	0
		Pequeños embalses construidos para la agricultura	1							
		Inundaciones inducidas por precipitaciones naturales	0							
		Drenaje de aguas pluviales (% del total de aguas pluviales canalizadas a sumideros)	3		0	1	0	1	0	0
		Ninguno	0							
Geomorfología	Relleno (% de cuevas/ sumideros rellenos)	>66%	3							
		34-66%	2							
		1-34%	1							
		Ninguno	0							
	Vertidos (% de sumideros afectados)	>66%	3							
		34-66%	2							
		1-34%	1							
		Ninguno	0							
		Grave	3							
		Alta	2		1	1	0	0	0	0
Suelos	Erosión	Moderado	1							
		Tasa natural	0							
		Niveles generalizados y elevados	3							
		Compactación debida al ganado o a las personas	2		1	1	1	1	0	0
	Inundación (inundación inducida por el hombre debido a la alteración de la superficie)	Niveles generalizados pero bajos	2							
		Pocas zonas concentradas aisladas	1							
		Ninguno	0							
		Inundación permanente de cuevas	3							
		Aumento de la inundación intermitente y >50% de llenado	2		N/A	0	N/A	0	N/A	N/A
		Aumento de la inundación	1							
Karst subterráneo										

		intermitente y <50% de llenado					
		Sólo inundaciones naturales debidas a fuertes precipitaciones	0				
		Destrucción generalizada	3				
	Eliminación de decoración - vandalismo	~50% de espeleotemas eliminados	2	N/A	0	N/A	0
		Puntos aislados de eliminación	1				
		Prístina	0				
		Eliminación de la mayor parte del material	3				
	Mineral - eliminación de sedimentos	~50% de cueva afectada	2	0	0	N/A	0
		Algunos puntos aislados	1				
		Prístina	0				
		La mayoría de los sedimentos del suelo - decoraciones afectadas	3				
	Compactación de sedimentos del suelo - destrucción	~ 50% de los sedimentos del suelo - decoraciones afectadas	2	N/A	0	N/A	0
		Pequeño sendero a través de la cueva	1				
		Casi prístina, principalmente roca superficie	0				
		Niveles generalizados y elevados	3				
	Atmósfera	Calidad del aire	Desecación	Niveles generalizados pero bajos	2	N/A	2
				Niveles aislados y muy bajos	1		
				Prístina	0		
				Niveles generalizados y elevados	3		
				Niveles generalizados pero bajos	2	N/A	N/A
				Niveles aislados y muy bajos	1		
				Prístina	0		
				Fuga de productos químicos concentrados en el acuífero	3		
	Hidrología	Calidad del agua - Prácticas de superficie	Plaguicidas y herbicidas	Fuerte fumigación de cultivos/maleza en superficie	2	0	0
				Poco uso de productos químicos	1		

Vertidos industriales o de petróleo	No se utiliza	0						
	>20 terrenos baldíos	3						
	10-19 Parques industriales abandonados	2						
	1-9 Parques industriales abandonados	1						
	0 Terrenos baldíos	0						
	Nocivo todo el año	3						
	Nocivo durante períodos cortos	2						
	Justo por encima de los niveles naturales	1						
	Agua prístina	0						
	>35	3						
Calidad del agua - Manantiales	15	2						
	<5	1						
	Sólo la variabilidad natural	0						
	Abandono total	3						
	Largos períodos de sequía (no estacionales)	2						
	Ligera reducción	1						
	Sin cambios	0						
Cantidad de agua	>66%	3						
	34-66%	2						
	1-34%	1						
	0	0						
Perturbación de la vegetación	Riqueza de especies (% de disminución)	50-75%	3					
		20-49%	2					
		1-19%	1					
		0	0					
Biota subterránea - Cueva	Densidad de población	50-75%	3					
		20-49%	2					
		1-19%	1					
		0	0					
Biota	Riqueza de especies (% de disminución)	50-75%	3					
		20-49%	2					
		1-19%	1					
		0 o aumento del número	0					
Subsuelo - Aguas subterráneas	Densidad de población	50-75%	3					
		20-49%	2					
		1-19%	1					
		0 o aumento del número	0					
Artefactos humanos	Densidad de población	50-75%	3					
		20-49%	2					
		1-19%	1					
		0 o aumento del número	0					
Cultural	Destrucción/eliminación de artefactos históricos (% tomado)	>50%	3					
		20-49%	2					
		1-19%	1					
		0	0					
Gestión de la región kárstica	Protección reglamentaria	Sin regulación	3					
		Algunas normativas débiles	2					
		Estatutos en vigor, pero con lagunas	1					
		Región totalmente protegida	0					
	Aplicación de	Destrucción	3	1	1	1	1	1

	la normativa	generalizada/sin aplicación					
		Sin vigilancia policial, pero con pocos daños	2				
		Aplicación poco frecuente	1				
		Aplicación estricta	0				
		Ninguna, hostilidad pública	3				
		Ninguna, indiferencia pública	2				
	Educación pública	Intentos a través de ONG	1	1	1	1	1
		Programas gubernamentales bien financiados	0				
		Principales autopistas	3				
		Algunas carreteras de dos carriles	2	1	1	1	1
	Construcción de carreteras	Algunos caminos rurales	1				
		Senderos menores	0				
		Grandes ciudades	3				
	Construir infraestructuras	Algunas carreteras de dos carriles	2	0	0	0	0
		Algunos caminos rurales	1				
		Sin desarrollo	0				
		Modificación importante	3				
	Construcción en cuevas	Gran cueva turística	2	N/A	0	N/A	0
		Sendero de la cueva señalizado	1				
		Prística	0				
		<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>5</b>
							<b>4</b>

Fuente: Elaborado por los autores, aplicando la metodología de van Beynen and Townsend [12].

Tabla 6.

Matriz del Índice de Perturbación del Karst, según la metodología de van Beynen and Townsend [12]. Se realizó una adaptación en la cual se corrige el valor total, considerando el número total de indicadores evaluados, sin considerar los N/A. Es decir que si un sitio se evaluó con 15 indicadores (no con los 30 indicadores de la matriz), su valor máximo sería sobre 45 (3 puntos por cada indicador). Este valor de la calificación total se corrige mediante una regla de tres simple.

Sitios	Total	Número de Indicadores Evaluados	Valor total Corregido	Afectación	Sensibilidad
Montelobos	<b>10</b>	17	<b>17,64 (0,176)</b>	Prístico	No Sensible
El Sótano	<b>12</b>	24	<b>15 (0,15)</b>	Prístico	No Sensible
Yutoto	<b>9</b>	16	<b>16.78 (0,168)</b>	Prístico	No Sensible
Resumidero	<b>10</b>	25	<b>12 (0,12)</b>	Prístico	No Sensible
Teposcolula	<b>5</b>	16	<b>9,38 (0,9)</b>	Prístico	No Sensible
Perales	<b>4</b>	16	<b>7,5 (0,75)</b>	Prístico	No Sensible

Fuente: Elaborado por los autores, adaptado de la metodología de van Beynen and Townsend [12].

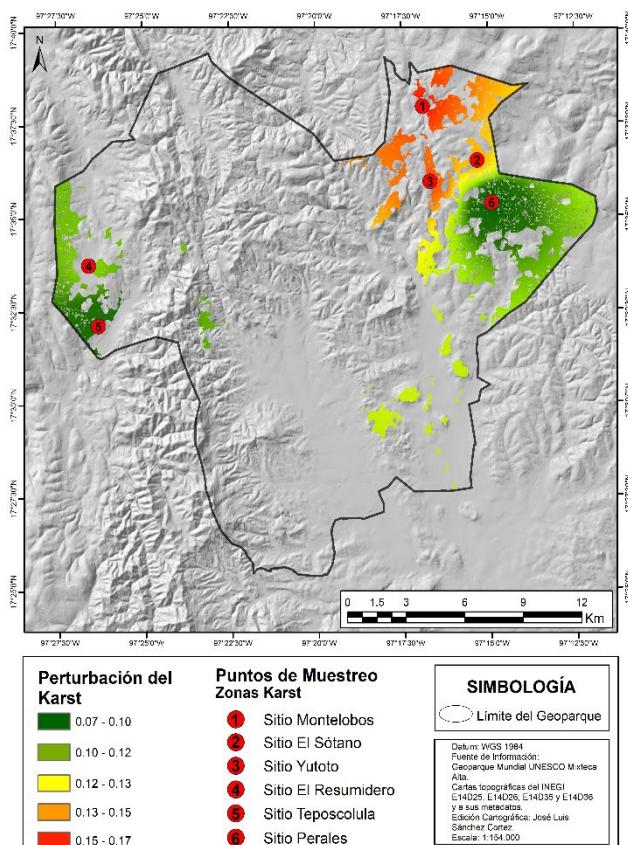


Figura 4. Mapa de distribución relativa de las perturbaciones del karst, a partir de la extrapolación de los datos obtenidos en los sitios de muestreo. Fuente: Elaborado por los autores.

En la recopilación de información en el campo, se identificó algunas actividades que se llevan a cabo en estas zonas, como la agricultura y la implementación de infraestructura asociada, como embalses para el almacenamiento de agua de pequeña escala, o el grabado de grafitis en algunas rocas. La influencia humana sobre los sistemas kársticos es notoria, sin embargo, no representan actividades con mayores perturbaciones. Los cambios en el entorno son leves, pero notorios, y las comunidades locales reconocen la existencia de un problema, cuando observan el deterioro y pérdida de los servicios ambientales año tras año. No obstante, pese a las acciones y presiones identificadas, los sistemas kársticos analizados aún no han alcanzado un punto crítico, según las evaluaciones realizadas. Sin embargo, esta tendencia sigue en aumento, y el ritmo de cambio, que muestra un crecimiento sostenido, podría modificarse o agravarse con el paso del tiempo.

El modelo de gestión territorial que poseen los gobiernos locales (municipios y agencias) en el estado de Oaxaca, es bastante particular, y la toma de decisiones se fragmenta según la jurisdicción de la autoridad, esta puede ser por regímenes de autoridades municipales y por autoridades agrarias (Bienes Comunales). En las comunidades del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, los Comisariados de Bienes Comunales y sus

asambleas generales deciden qué hacer o no con sus recursos, y esas decisiones pueden traducirse en su protección, o en su aprovechamiento. De cierta forma, este modelo político de usos y costumbres ha sido una poderosa herramienta para ejercer la protección y conservación de los bienes comunitarios dentro del territorio municipal.

No obstante, a pesar del control en el uso de los recursos, existen necesidades básicas por satisfacer, y el agua y los alimentos son dos de las más básicas. Las actividades agrícolas y la extracción de agua subterránea despiutan como las potenciales amenazas del karst en el área. Los sitios El Sótano, Yutoto y Resumidero aparecen como las áreas con mayor presencia de estas actividades. Vale indicar que el uso de plaguicidas y pesticidas no es una constante en estos sitios de estudio, su uso se restringe a pocos municipios ubicados en las zonas bajas del valle de Yanhuitlán, cuyas planicies se caracterizan por el desarrollo de cultivos de regadío y agricultura extensiva. Por otra parte, el turismo masivo, la exploración espeleológica, las construcciones turísticas y la actividad minera son factores que amenazan y generan presión sobre el karst, no obstante, no son actividades que despiutan dentro del GMUMA.

De manera general, el área presenta zonas kársticas expuestas, que dan a lucir una gran diversidad de morfología, producto de los procesos de disolución (Fig. 5). Tal como se observa en la Fig. 4, los sectores correspondientes a los sitios de Montelobos, El Sótano y Yutoto, aparecen como los lugares con mayores perturbaciones relativas dentro del área kárstica del Geoparque, y estas áreas corresponden a espacios destinados para la agricultura y el pastoreo. Al contrario, los sitios de Perales y Teposcolula se caracterizan por la presencia de cubiertas boscosas de pinos y encinos (Fig. 6). Esta dicotomía muestra un derrotero claro, en el cual las actividades humanas delinean el potencial estado de afectación y sensibilidad de las áreas kársticas estudiadas. Afectaciones que no se evidencian a profundidad, sin embargo, marcan una clara tendencia hacia la perturbación antrópica.



Figura 5. Imágenes de morfologías kársticas presentes en el GMUMA. a, morfologías kársticas en el sitio Yutoto. b, morfologías kársticas en el sitio El Sótano. c, morfologías kársticas en el sitio Teposcolula. d, morfologías kársticas en el sitio El Resumidero.

Debido a sus diversos intereses estratégicos, científicos y estéticos, el karst es un fenómeno muy atractivo que es ampliamente considerado en los geoparques, ya sea como un recurso didáctico o geoturístico. Ruban [33] menciona que, hasta 2018, el 37% de los Geoparques Mundiales UNESCO alojaban en su territorio algún tipo de fenómeno kárstico, lo cual denota la importancia de estos sistemas para las estrategias de geoconservación. Los geoparques orientan el uso de los georecursos de manera simultánea, tanto a la conservación como a promulgar su uso sostenible, lo que permite de alguna manera, minimizar los impactos y presiones. En este contexto, Sánchez Cortez et al. [16], realizaron una valoración de los ecosistemas kársticos en el Municipio de Archidona, aplicando el Índice de Perturbación del Karst dentro del Geoparque Mundial UNESCO Napo Sumaco, y cuyos resultados muestran una afectación menor y sensibilidad leve en el territorio, lo cual confirma el papel sustancial de los geoparques en el proceso de conservación.

Para desarrollar estrategias efectivas de conservación del karst en el futuro, es fundamental adoptar un enfoque holístico que abarque todo el ecosistema kárstico y sus características específicas. La implementación de un Geoparque en este territorio, no solo conlleva la protección del geopatrimonio y geositios, sino que también sugiere la

creación de programas educativos que sensibilicen a la sociedad sobre la variabilidad de ecosistemas y recursos frágiles, involucrando a la población en los procesos de monitoreo de los cambios a los cuales son susceptibles los elementos ambientales (entre ellos los sistemas kársticos), garantizando así la sostenibilidad de los procesos de conservación.

#### 4 Conclusiones

La presente investigación ha logrado alcanzar los objetivos propuestos, al evaluar de forma rigurosa el estado de conservación de los sistemas kársticos del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, empleando metodologías cuali-cuantitativas aplicadas en puntos de observación seleccionados estratégicamente. Se debe puntualizar que la delimitación precisa de las áreas kársticas constituye uno de los principales desafíos en el estudio de estos sistemas, por lo cual es pertinente resaltar la relevancia de la teledetección como una herramienta versátil y eficaz para identificar y caracterizar dichas zonas.

Los sitios analizados en el presente trabajo no muestran un marcado estado de perturbación o deterioro según la aplicación del Índice de Perturbación del Karst (KDI), pero esto no significa que estos sistemas no sean vulnerables a los factores asociados con la afectación del karst. Las tendencias pueden ser favorables y alentadoras en la actualidad, no obstante, no es apropiado soslayar su importancia, y al contrario se debe perfilar estrategias sostenibles para coadyuvar la preservación del karst. La gestión adecuada del agua subterránea mediante políticas apropiadas que eviten su sobreexplotación, la protección de la biodiversidad local afín a los ecosistemas kársticos, el uso sostenible del suelo y las prácticas agrícolas, el desarrollo de actividades turísticas responsables, todo esto en el marco de actividades educativas y de sensibilización, son acciones que deben ser aplicadas a corto y mediano plazo como parte del campo de acción del Geoparque.

El uso de índices de conservación proporciona una visión integral de los factores que afectan la dinámica del karst, permitiendo una evaluación detallada de su estado actual. Aunque los resultados obtenidos no alcanzaron valores representativos dentro del rango de evaluación establecido, sí revelan la presencia de actividades que generan impactos significativos en las áreas estudiadas, que podrían ocasionar transformaciones irreversibles en los ecosistemas kársticos, comprometiendo su estabilidad a largo plazo.

Además, los datos obtenidos a partir de estos índices funcionan como un diagnóstico preciso y específico de la situación actual, proporcionando una herramienta valiosa para la formulación de estrategias de conservación y gestión territorial. Al contar con esta información, es posible diseñar acciones preventivas que ayuden a minimizar los efectos negativos y fomentar un uso sostenible de los recursos kársticos. La implementación de políticas adecuadas, la educación ambiental y la participación comunitaria son claves para garantizar la preservación de estas áreas en el futuro. Este enfoque holístico no solo fortalece la toma de decisiones, sino que también facilita la identificación de áreas prioritarias para la conservación.

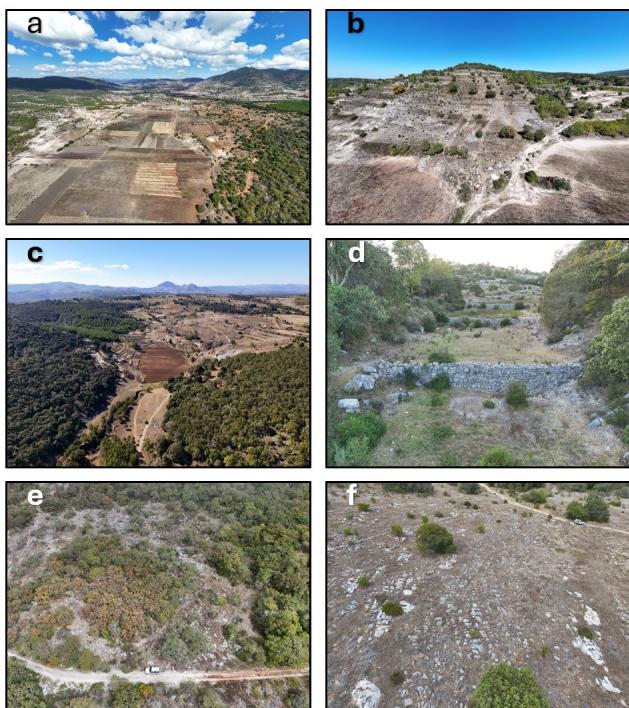


Figura 6. Imágenes de los sitios de estudio, con algunas de sus principales características. a, valle agrícola junto al sitio Resumidero. Los sedimentos generados por las labores agrícolas suelen ingresar dentro de las oquedades y causan enterramientos. b, vista aérea del sitio Montelobos. Nótense el alto grado de deforestación. c, imagen aérea del sitio El Sótano, donde también se aprecia los amplios espacios destinados para la agricultura. d, vista panorámica de las terrazas de cultivo, conocidas como *lamabordos*. Estas terrazas son construidas como estrategia que favorece la retención de sedimentos y humedad. e, vista aérea del sitio Perales, el cual se caracteriza por su importante cubierta boscosa. f, sitio Teposcolula, luce con espacios deforestados, junto con procesos activos de reforestación.

Fuente: Elaborado por los autores.

## Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a las comunidades locales que integran el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta por el respaldo brindado en este trabajo. En especial, se reconoce la colaboración de las autoridades municipales y agrarias de San Juan Teposcolula, San Bartolo Soyaltepec, San Juan Yucuita y Santa María Chachoapam, así como de las Agencias Municipales de San Agustín Montelobos, Guadalupe Gavillera y San Isidro Tejocotal. [16]

## Bibliografía

- ## Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a las comunidades locales que integran el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta por el respaldo brindado en este trabajo. En especial, se reconoce la colaboración de las autoridades municipales y agrarias de San Juan Teposcolula, San Bartolo Soyaltepec, San Juan Yucuita y Santa María Chachopam, así como de las Agencias Municipales de San Agustín Montelobos, Guadalupe Gavillera y San Isidro Tejocotal.

[16] Italy. Journal of Environmental Management, 90, pp. 1770–1781, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.018>

[17] Sánchez-Cortez, J.L., Fuentes-Campuzano, O., and Rosero-Lozano, J., Determination of disturbance levels in karstic areas with application of qualitative indicators: case studies in municipalities of Archidona and Pedro Carbo (Ecuador). International Journal of Geoheritage and Parks, 10(3), pp. 400–416, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.08.005>

[18] Prosser, C.D., Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. Proceedings of the Geologists' Association, 124, pp. 568–580, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2012.06.001>

[19] Evans, D., Brown, E., Larwood, J., Prosser, C., Silva, B., Townley, H., and Wetherell, A., Geoconservation: principles and practice. Natural England General Publication NE802, Natural England. 2023.

[20] Brilha, J.B., Património geológico e geoconservação: a conservação da Natureza na sua vertente geológica. Palimage Editores, Viseu, Portugal. 2005.

[21] Palacio-Prieto, J.L., Rosado-González, E., Ramírez-Miguel, X., Oropeza-Orozco, O., Cram-Heydrich, S., Ortiz-Pérez, M.A., Figueiroa-Mah-Eng, J.M., and Fernández de Castro-Martínez, G., Erosion, culture and geoheritage, the case of Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca, México. Geoheritage, 8, pp. 359–369, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0175-2>

[22] Mixteca alta aspiring geopark. Application dossier for the global Geopark Network. Oaxaca, México, 2015, 50 P.

[23] Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S.A., y Nieto-Samaniego, A.F., Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(3), pp. 494–516, 2008.

[24] Sánchez-Cortez, J.L., López-Castañeda, N., Orozco-Ramírez, Q., Palacio-Prieto, J.L., and Ramírez-Miguel, X., Updating the inventory of geosites in the mixteca alta UNESCO global geopark through the application of participatory strategies. Geoheritage, 17(74), 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12371-025-01120-6>

[25] U.S., Geological Survey. Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) Level 1 precision terrain corrected registered at-sensor radiance. Product (AST\_L1T) [online]. Sioux Falls, Dakota del Sur: USGS EROS Data Center, [consulted: February 10th, 2025]. 2020. Available at: [https://lpdaac.usgs.gov/products/ast\\_11tv003/](https://lpdaac.usgs.gov/products/ast_11tv003/)

[26] Vargas-Gonzales, C., Identificación de depósitos utilizando el sensor Aster. Geología Colombiana, 38, pp. 179–157, 2013.

[27] Hartz, D., Prashad, L., Hedquist, B., Golden, J., and Brazel, A., Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions. Remote Sensing of Environment, 104(02), pp. 190–200, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.019>

[28] Ninomiya, Y., Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. Sensors, systems, and Next-Generation Satellites, VII 2004, pp. 180–190. DOI: <https://doi.org/10.1111/12.511902>

[29] North, L.A., Application and refinement of the karst disturbance index in west central, Florida, MSc. Thesis, Department of Geography, College of Arts and Sciences, University of South Florida, USA. 2007.

[30] Uasapud-Enríquez, N.V., Aplicación de índices de conservación para conocer el estado y las prioridades de conservación en algunos elementos del Karst del Oriente Antioqueño, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia, 2018.

[31] Estrada-Medina, H., y Álvarez-Rivera, O., Distribución geográfica y características del medio físico natural de los ambientes Kársticos de México. Acta Universitaria, 34, pp. 1–26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2024.3840>

[32] Espinasa-Pereña, R., El Karst de México, mapa NA III 3. En: A. Coll-Hurtado (coord.), Nuevo atlas nacional de México [date of reference May 22<sup>th</sup> of 2025]. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Available at: [https://www.igeograf.unam.mx/Geodig/nvo\\_atlas/index.html/\\_5\\_naturaleza\\_ambiente/3\\_geomorfologia/NA\\_III\\_3.jpg](https://www.igeograf.unam.mx/Geodig/nvo_atlas/index.html/_5_naturaleza_ambiente/3_geomorfologia/NA_III_3.jpg)

[33] INEGI, Densidad de población por entidad federativa, serie de años censales de 1990 a 2020 [Online]. 2025. [date of reference May 22<sup>th</sup> of 2025]. Available at:

- https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Poblacion\_Poblacion\_07\_fb7d5132-39f0-4a6c-b6f6-4cbe440e048d
- [33] Ruban, D.A., Karst as important resource for Geopark-Based Tourism: current state and biases. *Resources*, 7(4), art. 82, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources7040082>

**J.L. Sánchez-Cortez**, Ingeniero Geólogo por la Universidad de Guayaquil (2005), Máster en Ciencias con énfasis en Manejo Sustentable de Recursos Bio Acuáticos y Medio Ambiente por la Universidad de Guayaquil (2010), Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo por la Universidad Autónoma de Baja California (2013). Investigador del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, con más de 15 años de experiencia docente. Experto en patrimonio geológico, geoturismo, investigación del karst y geoconservación basado en estructuras de participación social comunitaria. Ha participado en talleres y proyectos sobre Geopatrimonio, Geodiversidad, Geoconservación y Geoparques en América Latina, Europa y Asia. Miembro del Comité Científico del Geoparque Mundial de UNESCO Mixteca Alta (México) y Coordinador Científico del Geoparque Mundial UNESCO Napo Sumaco (Ecuador) y Ex Coordinador del Comité Ecuatoriano de Geoparques.

ORCID: 0000-0002-1236-2848

**N. López-Castañeda**, Licenciada en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (2016), Maestra en Geografía por la UNAM (2019). Profesora de asignatura en el Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras, UNAM (2019-2021), Asistente de profesor en la Escuela de Ciencias Geográficas y Planeación Urbana de la Universidad Estatal de Arizona (2021-2022), Técnica Académica de la Licenciatura en Geografía Aplicada de la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM (2022-2023). Miembro del Comité Científico del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta.

ORCID: 0009-0008-8488-1170

**K. Vélez-Macías**, Ingeniera Ambiental por la Universidad de Guayaquil (2023), actualmente cursa la Maestría en Geografía en el campo de Geografía Ambiental en la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus intereses de investigación incluyen: Sistemas de Información Geográfica, Teledetección, Geoparques, Geodiversidad y Geoconservación.

ORCID: 0009-0000-8732-3205

**O.B. Ortega-Díaz**, Licenciado en Artes Visuales por la UNAM (2024), especializado en realización audiovisual, comunicación y museografía. Encargado de Comunicación Social de la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México (2022-2024), coordinando identidad gráfica y divulgación científica. Colaborador desde 2021 del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta en coordinación del área de Comunicación Social. Coautor de publicaciones sobre educación ambiental y patrimonio geológico, integrando enfoques artísticos en Geoconservación.

ORCID: 0009-0000-7312-3085