POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

IMPACTO DE LA UNIDAD MINERA EL ROBLE (DURANGO, MÉXICO) SOBRE LA BIODIVERSIDAD DE SU SISTEMA AMBIENTAL REGIONAL

Tesina que presenta

Jaime Oláguez Martínez

Para obtener el grado de

ESPECIALISTA EN ECOLOGÍA APLICADA

Director

Dr. Ernesto Iván Badano

San Luis Potosí, México, octubre de 2024

IPICYT
INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE LA TESINA

La tesina “Biodiversidad en el sistema ambiental regional de la Unidad Minera El Roble, Cuencamé, México”, presentada para obtener el Grado de Especialista en Ecología Aplicada, fue elaborada por Jaime Oláguez Martínez y aprobada el 04 de octubre de 2024 por los suscritos, designados como Jurado de Tesina por el Colegio de Profesores de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Ernesto Iván Badano
Director de tesina

Joel David Flores Rivas
Sinodal

Alfredo Ramírez Hernández
Sinodal

DEDICATORIA

A mi madre Ma. Magdalena Martínez Martínez (†) quien sin estudios logró brindarme las posibilidades de prepararme y formarme como profesionista e infundió en mí el sentido de ética y responsabilidad.

A mi padre Antonio Oláguez Oláguez (†), quien me apoyo en mi etapa de licenciatura y me brindo las posibilidades económicas.

A mi esposa Blanca Estela Chirinos Casas, quien me ha apoyado en los tiempos más difíciles y que a pesar de las adversidades ha estado conmigo y brindado su apoyo incondicional.

A mis hijos Jaime Antonio, Amaia y Darius, que al verlos y estar con ellos me motivan a ser mejor.

A mis hermanos Juan Manuel, Marisela (Cristela), Rubén y Elvia, por ser el tipo de familia que se necesita a lo largo de toda una vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, la División de Ciencias Ambientales por brindarme la oportunidad de obtener la especialización que contribuirá a mi desarrollo profesional.

Al Dr. Ernesto Iván Badano, por la paciencia y tiempo que le dedico a mi proceso de estudio y posteriores comentarios para con este trabajo.

Al Ing. Carlo Zapata Pérez por las facilidades brindadas.

A la Srta. Ma. Luisa Soto Moreno, porque me impulsa a superarme día a día.

A la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal Integral “Topia” y a su personal, que mostraron la disposición para el desarrollo de este trabajo.

Al T. I. F. Natividad Rivas Ortiz y el T. I. F. Omar Castañeda Lucero, por su esfuerzo en la recopilación de datos de biodiversidad en los años 2014 y 2022.

A la Ing. Elizabeth Torres Woo, por brindarme las facilidades y autorización para el uso de la información aquí utilizada y sobre todo su amistad y disposición.

CONTENIDO

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE LA TESINA ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTOS iv
RESUMEN 1
ABSTRACT 2
INTRODUCCIÓN 3
Planteamiento del problema 3
Métricas de biodiversidad 4
Esfuerzo de muestreo 7
HIPÓTESIS 9
OBJETIVO 9
MATERIALES Y MÉTODOS 10
Área de estudio 10
Diseño del muestreo 15
Procesamiento de datos de campo 18
Manejo de bases de datos 18
RESULTADOS 20
Diversidad de la flora 20
Curvas de rarefacción para la fauna 29
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 36
COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES 39
LITERATURA CITADA 40

RESUMEN

La minería es una actividad productiva que requiere sitios para la extracción del mineral de interés e instalaciones especializadas para su procesamiento, las que generalmente se ubican en los terrenos naturales donde se desarrolla el proyecto. Invariablemente, esto impacta en los ecosistemas y afecta su flora y fauna, lo que genera la necesidad de comparar los beneficios económicos versus los daños ambientales. Bajo esta perspectiva, este estudio se realizó a nivel de Sistema Ambiental Regional para conocer el grado de afectación sobre la biodiversidad que provoca la operación y la expansión de la Unidad Minera El Roble, Durango, México. Específicamente se compara la diversidad de plantas y vertebrados entre el año 2020, previo a la ampliación de las instalaciones y del depósito de residuos minero-metalúrgicos, y el año 2024, tras la implementación de los trabajos de desmonte. Para comparar la diversidad de especies se emplearon las mismas metodologías de muestreo ambos años. El muestreo de vegetación comprendió los estratos arbóreos, arbustivos y de herbáceas, como también de plantas suculentas. Para la fauna se consideraron tres grupos principales, incluyendo aves, reptiles y mamíferos. Con esta información se confeccionaron curvas de acumulación de especies utilizando procesos de rarefacción. El análisis incluyó el cálculo del índice de diversidad proporcional de Shannon y de equidad de especies de Pielou. Los resultados indican que, en general, la diversidad de la flora y la fauna disminuyeron tras la implementación del proyecto. Por lo tanto, se concluye que las actividades de protección y fomento a la biodiversidad deben intensificarse y diversificarse en el sitio de estudio.

Palabras clave:

Curvas de acumulación de especies, Índices de diversidad, Riqueza de especies, Diversidad proporcional de especies, Equidad de especies

ABSTRACT

Impact of "El Roble Mining Unit (Durango, Mexico) on the biodiversity of its regional environmental system:

Mining is a productive activity that requires sites for extracting of the target mineral and specialized facilities to process it, which are commonly located on natural lands. This invariably impacts the ecosystems and affects their flora and fauna, raising questions aimed to compare the economic benefits versus the environmental damage. From this perspective, this study was conducted at Regional Environmental System level to determine the degree of impact on biodiversity caused by the operation and expansion of the El Roble Mining Unit, Durango, Mexico. We specifically compared the diversity of plants and vertebrates between 2020, before the expansion of the facilities and the mining-metallurgical waste deposit, and 2024, after the implementation of the forest clearing. To compare the diversity of species between those years, the same sampling methodologies were both years. For vegetation, we sampled tree, shrub and herbaceous strata, as well as succulent plants. Samplings of fauna considered three main groups, including birds, reptiles and mammals. With this information, species accumulation curves were built using rarefaction processes. These analyses included the calculation of the Shannon proportional diversity index and the Pielou species evenness. The results indicate that flora and fauna diversity decreased after the implementation of the project. Therefore, we conclude that activities for biodiversity protection and promotion must be intensified and diversified in the study site.

Keywords:

Species accumulation curves, Diversity indices, Species richness, Proportional species diversity, Species evenness

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

México alberga una elevada diversidad de especies. Ocupa el quinto lugar mundial en flora, con 23,314 especies de plantas de las 250 mil existentes (Villaseñor, 2016), mientras que contiene 2,378 especies de vertebrados entre de reptiles, mamíferos, anfibios y aves (INEGI, 2003). Esta biodiversidad se distribuye en 15 regiones fisiográficas (INEGI, 2003) que contienen diversos ecosistemas, desde selvas tropicales húmedas y semihúmedas en el sur de México hasta desiertos cálidos y templados en el norte del país. Los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas son muy importantes, ya que ocupan poco más de la mitad del territorio nacional y se estima que albergan 6 mil especies vegetales (Agua.org.mx, s.f.). Por estos motivos, el área de estudio de este trabajo se ubica en el corazón de las zonas áridas del estado de Durango.

Las zonas áridas de México presentan altos índices de endemismos y esas especies deben ser conservadas para evitar el detrimento de sus poblaciones y reducir su riesgo de extinción, especialmente bajo la premisa de que todo ser vivo participa en los flujos de materia y energía que sustentan el funcionamiento de los ecosistemas. Los métodos ideales de conservación, bajo un criterio idealista, sería no perturbar los hábitats naturales. Sin embargo, el desarrollo de las sociedades humanas modernas se basa en el aprovechamiento de los recursos naturales, con lo que se cubren tanto necesidades básicas (ej., alimentación, acceso a energía eléctrica, entre otros) como secundarias (ej., ocio y recreación, entre otras), lo que hace imposible mantener un esquema de conservación bajo el principio de “no tocar”. En este sentido, es deseable conocer la biodiversidad que se concentra en áreas con actividades humanas de alto impacto, como la minería, tanto antes como después de que se inician dichas actividades.

La riqueza y la abundancia de especies de flora y la fauna en un determinado ecosistema se estiman con herramientas matemáticas conocidas como métricas de diversidad, donde la aplicación de estas herramientas proporciona información para tomar decisiones destinadas a actividades de conservación local. Sobre esta base, este trabajo busca otorgar un panorama comparativo de la de diversidad de flora y fauna entre dos momentos del tiempo en un área afectada por las actividades humanas. Específicamente, el trabajo se enfocará a escala de Sistema Ambiental Regional (SAR), que en la Guía para la Elaboración de la Manifestación de Impacto Ambiental en Modalidad Regional de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT 2022), se define como: “*Espacio finito definido con base en las interacciones entre*

los medios abiótico, biótico y socioeconómico de la región donde se pretende establecer un proyecto, generalmente formado por un conjunto de ecosistemas y dentro del cual se aplicará un análisis de los problemas, restricciones y potencialidades ambientales y de aprovechamiento". Tomando como referencia esta definición, el estudio se desarrolló en el SAR de la Unidad Minera El Roble, Durango, México, operada por Industrias Peñoles, sin incluir aquellas áreas que fueron sujetas a cambios en el uso de suelo por las diferentes obras de la unidad minera. Esto porque la ejecución de proyectos de aprovechamiento en ecosistemas naturales involucra impactos sobre la biodiversidad que se extienden más allá de las áreas que son sujetas al cambio de uso de suelo.

En cuanto a las métricas de biodiversidad, se debe indicar que las herramientas y técnicas disponibles realizan estimaciones a partir de información parcial colectada en muestreos realizados dentro de la unidad espacial de estudio. Generalmente, estas metodologías se utilizan para comparar conjuntos de organismos detectados en una serie de localidades que difieren en una o más características ambientales (Moreno, 2001). Sin embargo, como es el caso de este trabajo, esas métricas también se pueden emplear para comparar la diversidad de especies entre diferentes momentos del tiempo en una misma área. En concreto, considerando al SAR como la unidad de estudio, esas métricas se calcularon con información de flora y fauna colectada en 2020, antes de una gran expansión de la Unidad Minera El Roble que afectó 185 hectáreas, y en 2024, cuatro años después de ejecutadas las actividades de cambio de uso del suelo. Sobre esa base, la principal justificación de este trabajo radica en proporcionar información que otorgue criterios para dirigir acciones de conservación de flora y fauna que puedan ser ejecutadas dentro del SAR.

Métricas de biodiversidad

Las métricas de biodiversidad surgen de la inquietud de cuantificar el número y la abundancia de especies en un ecosistema para poder comparar esos valores con los de otros ecosistemas (Escalante y Morrone, 2001). Magurran (2004) menciona que la tendencia en el desarrollo de estas métricas es a través de modelos que mejoran la información filogenética que se encuentra en grandes bases de datos y que actualmente son de fácil manejo. Sin embargo, la gran cantidad de métricas y métodos existentes para cuantificar la biodiversidad ha generado controversias sobre cuál es el método que mejor estima esas variables. Algunos autores, como Moreno (2001), indican que no existen métodos mejores o peores para medir y comparar la biodiversidad. En cambio, este autor propone que, para definir qué método se debe empelar, se

deben tomar en cuenta distintas facetas de la biodiversidad y, en función de cada una de estas, escoger el más adecuado para los ecosistemas en cuestión. Así, para tomar la decisión de optar por un método u otro, el investigador debe tomar en cuenta presenta una serie de variables durante la planeación de los muestreos para obtener la información en campo. Algunas fuentes de información que pueden ser tomadas en cuenta para definir el método que mejor se adapte a las necesidades del investigador son aquellos que se aplicaron con anterioridad en investigaciones con el mismo grupo taxonómico, pero también se deben considerar las restricciones matemáticas del método y los supuestos biológicos en que se basan. En todos los casos, la decisión del investigador es la de mayor relevancia.

Rush (2021) define las métricas de biodiversidad como cualquier "*parámetro o variable cuantitativa o cualitativa empleado como instrumento de medición, que nos provee evidencia de un fenómeno que se desea conocer, monitorear y analizar, que pueda ser contrastado en diferentes momentos del tiempo*". Estos indicadores o índices de biodiversidad proporcionan resultados cuantitativos y/o cualitativos que permiten al investigador llevar a cabo una evaluación de cierto aspecto de una comunidad biológica. El uso de estos indicadores permite que, con una menor cantidad de réplicas en el esfuerzo de muestreo, se pueda llegar a una descripción objetiva de la comunidad biológica en la que se está trabajando.

El análisis de la biodiversidad se puede realizar a varios niveles. La alfa diversidad estima variables dentro de una misma comunidad, la beta diversidad trabaja con valores entre comunidades y, finalmente, la gamma diversidad considera valores entre un conjunto de comunidades (Whittaker, 1972). En cualquier nivel que se esté trabajando, es importante tomar en cuenta el grupo biológico objetivo, el acceso a la información disponible y si existen trabajos previos con el mismo grupo (Moreno, 2001). Este estudio, en particular, se enfoca en realizar comparaciones entre diferentes momentos del tiempo de la alfa diversidad de flora y fauna (Halffter *et al*., 2005).

Los ecólogos han desarrollado diversas métricas para medir la alfa diversidad, loque ha propiciado la generación de una gran cantidad de índices de los cuales, en base a los objetivos que se persigan, se puede elegir uno u otro. La elección de determinado índice siempre representa un reto sobre la decisión de utilizar otro. Esto es poque los índices con mayor complejidad para su cálculo suelen ser los más populares, pero esto no necesariamente significa que sean los mejores

para aplicar en todos los ecosistemas (Magurran, 2004). Sobre esta base, para este trabajo se escogieron los siguientes índices de diversidad de especies:

Riqueza de especies (*S*). Esta métrica de diversidad de especies es, simplemente, el número de especies de un taxón, o taxones de interés, contenida en una muestra o en un conjunto de muestras (Magurran, 2004).

Índice de diversidad proporcional de Shannon (*H'*). Este es un índice derivado de la teoría de la información de Claude Shannon (1949). El índice se basa en que la diversidad, o información contenida en un sistema natural, puede medirse de manera similar a la información contenida en un código o un mensaje. Se asume que los individuos se muestrean aleatoriamente de una comunidad infinitamente grande y que todas las especies están representadas en la muestra (Magurran, 2004). El índice de Shannon (*H´*) es uno de los más populares para cuantificar la biodiversidad específica, derivado de la teoría de información como una medida de la entropía. El índice refleja la heterogeneidad de una comunidad en base de dos factores: el número de especies presentes y la abundancia relativa de cada especie. Conceptualmente es una medida del grado de incertidumbre asociada a la selección aleatoria de un individuo en la comunidad (Pla, 2006) y se calcula como:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i ln p_i,$$

donde *H'* es el Índice de Shannon, *S* es el número de especies y p_i es la proporción de individuos de la especie *i* en la muestra. En esta fórmula, *ln* hace referencia al logaritmo natural de los valores, aunque pueden emplearse logaritmos en cualquier base para su cálculo.

Índice de equidad de Pielou (J´). Mide la distribución de los individuos entre las especies registradas en un muestreo, computándose como la diversidad observada en relación a la máxima diversidad esperada. Su valor oscila entre 0 y 1, donde 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes y el 0 señala la ausencia total de uniformidad. Basándose en el índice de Shannon, Pielou (1975) propuso que la equidad se puede estimar como:

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\ln(S)}$$

donde *J'* es el índice de Pielou, *H'* es el Índice de Shannon y *S* es el número de especies detectadas en el muestreo. Nuevamente, *ln* hace referencia al logaritmo natural de los valores y, aunque pueden emplearse logaritmos en cualquier base, en este caso debe tener la misma base que el empleado para calcular el índice de Shannon.

Esfuerzo de muestreo

Según Magurran (2004), el esfuerzo de muestreo, o tamaño de la muestra, debe ser suficiente y adecuado para cumplir los objetivos que se persiguen en la investigación. Por su parte, Mostacedo (2000) indica que el diseño del muestreo es la parte que requiere mayor cuidado en un estudio de biodiversidad, ya que éste determina el éxito potencial de la investigación. Aunque los muestreos para estimar las métricas de diversidad de especies de un conjunto de comunidades bióticas pudieran aparentar simpleza, Magurran (2004) especifica que esta facilidad es una ilusión, ya que un muestreo efectivo debe considerar la distribución y abundancia de especies, requiriendo un mayor esfuerzo de muestreo en donde la uniformidad sea más baja. Mostacedo (2000) indica que la muestra debe, entonces, considerar la mayor variabilidad existente de una comunidad y que la representatividad está dada por el número de réplicas a tomarse en cuenta.

El adecuado diseño e intensidad del muestreo deben considerar la mayor variabilidad existente en una comunidad, lo que otorga al investigador los elementos para definir la representatividad del esfuerzo de muestreo, que estará dada por el número de sitios a relevar y los factores que influyen en determinada variable (Mostacedo, 2000). Bajo estos criterios, la eficacia del esfuerzo de muestreo deberá tomar en cuenta la abundancia de especies y la riqueza. Al aumentar el número de réplicas en un muestreo, su representatividad es mayor, donde la cantidad de réplicas necesarias para alcanzar esto pueden ser estimadas con métodos matemáticos (Magurran, 2004). Aun así, es necesario tomar en cuenta que siempre existen limitaciones financieras, de tiempo y distancia, como también de factores ambientales y sociales que pueden impedir un adecuado proceso de toma de información.

Mostacedo (2000) refiere que, en ecología, se utiliza una serie de herramientas informáticas y estadísticas, como las curvas especie-área o curvas especie-distancia, que permiten cumplir de manera estricta los requerimientos del esfuerzo de muestreo. Otros autores, como Magurran (2004)

y Moreno (2001), describen metodologías conocidas como curvas de acumulación de especies, donde la cantidad de réplicas necesarias se define por la riqueza capturada en el muestreo, que va integrándose a la base de datos conforme se avanza en la toma de información. Esto se explica porque, al iniciar el muestreo, en el primer sitio se podría encontrar una riqueza de cinco especies ($S = 5$), en el siguiente sitio pudiera no encontrarse ninguna de esas especies, pero si una especie adicional que se integra a la base de datos ($S = 6$) y, así, van aumentando las nuevas especies hasta que ya no se añadan más. Si se grafica el número de especies en función del número de muestras, se debiera tener una curva donde la riqueza aumenta con el esfuerzo de muestreo hasta alcanzar una tendencia asintótica, lo que permitiría concluir que el muestreo fue lo más completo posible (Figura 1).

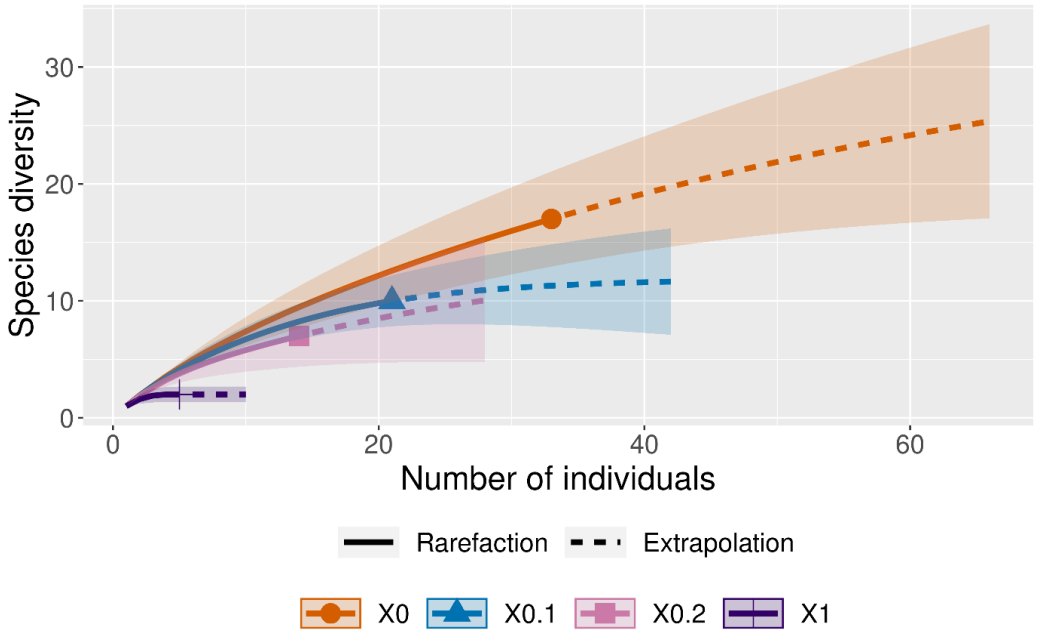

Figura 1. Ejemplo de una curva de acumulación de especies que se pudiera obtener con la metodología descrita en el texto (Fuente: Datos propios, software iNext).

Algunos índices basados en la riqueza de especies, como el de Margalef y el de Menhinick (Apéndice 1), han sido propuestos para minimizar los efectos de la abundancia de individuos, pero este ajuste ha mostrado ser insuficiente (Magurran, 2004). La solución más aceptada para resolver lo anterior es utilizar técnicas de rarefacción, que es una forma de remuestrear aleatoriamente la información de las parcelas de muestreo en función de un tamaño de muestra único (Stevens, 2009).

HIPÓTESIS

Considerando los antecedentes provistos anteriormente, este estudio pretende poner a prueba la siguiente hipótesis:

Si los actuales valores de alfa diversidad, tanto de flora como de fauna, en el SAR de la Unidad Minera El Roble son similares a los que había antes de su expansión, entonces se pudiera concluir que los cambios en el uso del suelo asociados a esas actividades no han tenido impactos sustanciales a nivel regional. En caso contrario, se pudiera concluir que un período de cuatro años no es suficiente para que el SAR de la Unidad Minera El Roble recupere su diversidad de especies después de la expansión de la obra, lo que indicaría que esos cambios en el uso del suelo indujeron una elevada degradación ambiental.

OBJETIVO

Establecer si la diversidad de la flora y la fauna en el SAR de la Unidad Minera El Roble, después de cuatro años desde su ampliación, es similar o menor a la que había antes de que se indujeran cambios en el uso del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se confeccionaron curvas de rarefacción para diversas métricas de diversidad de especies, las que se construyeron con información provista por los esfuerzos de muestreo realizados en el SAR de la Unidad Minera El Roble en dos momentos del tiempo: (1) 2020, antes de que se produjera la expansión de la obra y (2) 2024, cuatro años después de la expansión de la obra. Esto permitió realizar una comparación temporal de la diversidad para la flora y de la fauna del SAR y, a su vez, definir el grado de afectación que tuvo la ampliación de la superficie destinada a las actividades productivas, como también la eficacia de las acciones de conservación y de compensación que allí se desarrollan.

Área de estudio

La construcción de la Unidad Minera El Roble comenzó en 2010 y concluyó a finales de 2012, con una inversión de US$ 206 millones. El proyecto se ubica en el municipio de Cuencamé, Durango, siendo Velardeña la población de referencia, a una distancia aproximada de 168 km de la capital estatal (**Figura 2**). El sistema geológico de la región proviene de la era Cenozoica y Mesozoica. Las rocas en las cuencas aluviales incluyen metamórficas, ígneas y sedimentarias del Paleozoico Superior al Reciente y, en general, están bordeadas por los sedimentos aluviales. Las rocas son esquistos, calizas, areniscas y lutitas del Mesozoico, junto con rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Mesozoico y Cenozoico. De acuerdo a la carta temática de geología donde se ubica el proyecto, editada por el INEGI, la descripción del SAR se entrega en el Cuadro 1. Los ecosistemas incluidos en el SAR de la obra están principalmente compuestos por Matorral Desértico Micrófilo y, en menor proporción, por Matorral Desértico Rosetófilo.

Esta unidad minera inició su operación en mayo de 2013 y ha demostrado un desempeño muy satisfactorio. Además, cuenta con instalaciones vanguardistas de tecnología sustentable, como celdas solares, iluminación LED y plantas tratadoras de agua. La mina produce tres tipos de concentrados, incluyendo zinc, plomo y cobre, y se encuentra en un depósito tipo Skarn con sulfuros diseminados y semimasivos (Peñoles, 2021). En el 2020 se desarrollaron actividades para la ampliación de las instalaciones y el depósito de residuos minero-metalúrgicos, lo que requirió la contratación de empresas para la evaluación del impacto ambiental y cambio de uso de suelo. Una de las empresas contratadas fue la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal Integral “Topia” S.C. Esta empresa, a través de su departamento de cambio de uso de suelo e impacto

ambiental, desarrolló muestreos dentro del SAR antes del impacto ocasionado por la expansión sobre 185 hectáreas. Las obras de minería ocupaban en 2020 un área autorizada de 150 ha, dentro de las 6,649 ha que cubre el SAR de la Unidad Minera El Roble. Dentro de las afectaciones más relevantes, por su extensión y posibles impactos ambientales, se encuentran los depósitos de jales, que en este punto hay tres instalados y un cuarto se encuentra en construcción. Todos los resultados derivados de esta investigación forman parte de Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) y Estudios Técnicos Justificativos para Cambio de Uso de Suelo (ETJ), los cuales fueron evaluados por la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente de México (SEMARNAT). Toda la información que se analizó para elaborar este documento cuenta con la autorización del Grupo Industrial Peñoles para su uso y difusión a través del departamento ambiental de la Unidad Minera El Roble y del director técnico de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal Integral "Topia" S.C.

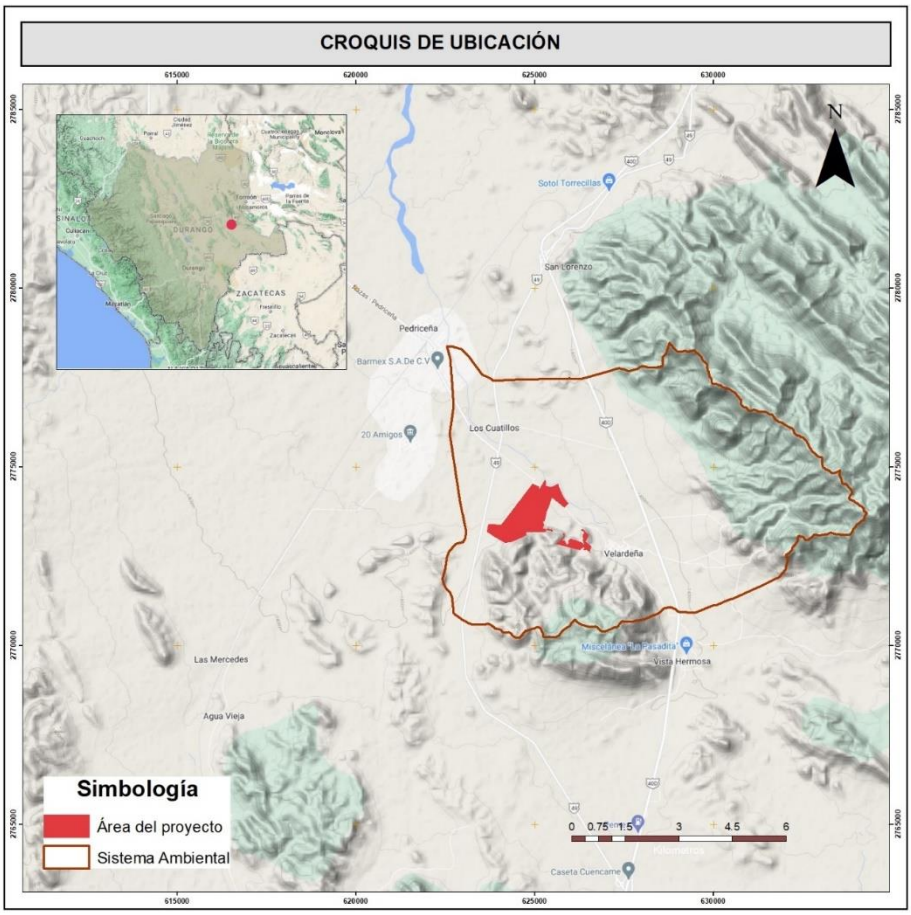

Figura 2. Ubicación estatal del proyecto en la Unidad El Roble, Durango.

Cuadro 1. Geología dentro del SAR de la unidad minera El Roble, Durango.

Clave	Clase	Tipo	Era	Sistema	Sup. (ha)	%
Ki(cz)	Sedimentaria	Caliza	Mesozoico	Cretácico	2,035.890	30.6
Q(s)	N/A	N/A	Cenozoico	Cuaternario	3,426.728	51.5
T(Igia)	Ígnea intrusiva	Ígnea intrusiva ácida	Cenozoico	Terciario	1,137.945	17.1
Ti(cg)	Sedimentaria	Conglomerado	Cenozoico	Paleógeno	51.562	0.77
				Total	**6,652.125**	**100**

El relieve se caracteriza por grandes planicies, principalmente en el centro y norte del SAR, que están bordeadas por dos serranías de entre 1,600 y 1,800 msnm. En el Cuadro 2 se presentan las superficies que cubren las diferentes pendientes topográficas al interior del SAR. La pendiente dominante está dentro del rango de 0 al 10%, ocupando una superficie de 3,511 hectáreas (53% del SAR). En el

Rangos (%)	Superficie (ha)	%
0 - 10%	3,511.237	53.23
10 - 20%	566.533	8.59
20 - 30%	381.787	5.79
30 - 40%	442.968	6.72
40 - 50%	493.563	7.48
50 - 60%	466.275	7.07
60 - 70%	350.299	5.31
70 - 80%	202.847	3.08
80 - 90%	98.577	1.49
90 - 100%	45.423	0.69
100 - 110%	21.410	0.33
110 - 120%	8.643	0.13
120 - 130%	4.055	0.06
130 - 140%	1.727	0.03
140 - 150%	0.726	0.01
150 - 160%	0.275	0.00
160 - 170%	0.275	0.00
170 - 180%	0.050	0.00
Total	**6,596.670**	**100**

Cuadro 3 se aprecia la exposición de las diferentes superficies que cubren el SAR, donde la exposición dominante es la Suroeste, ocupando una superficie de 1,603 hectáreas (24% del SAR).

Cuadro 2. Pendientes dentro del SAR de la unidad minera El Roble, Durango.

Rangos (%)	Superficie (ha)	%
0 - 10%	3,511.237	53.23
10 - 20%	566.533	8.59
20 - 30%	381.787	5.79
30 - 40%	442.968	6.72
40 - 50%	493.563	7.48
50 - 60%	466.275	7.07
60 - 70%	350.299	5.31
70 - 80%	202.847	3.08
80 - 90%	98.577	1.49
90 - 100%	45.423	0.69
100 - 110%	21.410	0.33
110 - 120%	8.643	0.13
120 - 130%	4.055	0.06
130 - 140%	1.727	0.03
140 - 150%	0.726	0.01
150 - 160%	0.275	0.00
160 - 170%	0.275	0.00
170 - 180%	0.050	0.00
Total	**6,596.670**	**100**

Cuadro 3. Corrientes superficiales en el SAR de la unidad minera El Roble, Durango.

Exposiciones	Superficie (ha)	%
Cenital (Z)	819.076	12.42
Norte (N)	409.293	6.21
Noreste (NE)	230.766	3.50
Este (E)	243.248	3.69
Sureste (SE)	536.368	8.13
Sur (S)	1,405.799	21.31
Suroeste (SW)	1,602.802	24.30
Oeste (W)	845.123	12.81
Noroeste (NW)	503.470	7.63
Total	**6,595.945**	**100**

El clima de la región es semicálido, con temperatura media anual de 18° a 22 °C. El régimen de lluvia es de verano, con una precipitación media anual de 332.1 mm. Las lluvias ocurren principalmente en los meses de junio a septiembre (UCDFI, 2024). De acuerdo con la cartografía temática, editada por el INEGI, a nivel del SAR se tienen presentes las corrientes de agua superficiales descritas en el **Cuadro 4.**

Cuadro 4. Corrientes superficiales en el SAR de la unidad minera El Roble, Durango. Fuente: https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl

Propiedad	Arroyos			
	Arroyo Cuencamé	Arroyo La Salida	Arroyo El Congreso	Arroyo El Cajoncillo
Temporalidad	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Coeficiente de escurrimiento	Intermitente	1 al 5 %	1 al 5 %	1 al 5 %
Elevación máxima	1 al 5 %	1635 m	1837 m	2261 m
Elevación media	2153 m	1490 m	1603 m	1858 m
Elevación mínima	1728 m	1345 m	1380 m	1456 m
Longitud	1304 m	6023 m	4476 m.	5718 m
Pendiente Media	82445 m.	4.8148%	9.9865%	14.0780%
Tiempo de Concentración	1.0297%	50.82 (minutos)	28.08 (minutos)	29.21 (minutos)
Área Drenada	689.29 (minutos)	4.02 km^2	2.08 km^2	2.85 km^2
Periodo de Retorno	1252.36 km^2	5 años.	5 años.	5 años.
Intensidad de Lluvia	5 años.	390.71 mm/h	706.60 mm/h	677.76 mm/h
Flujo mínimo	28.90 mm/h	43.63 m^3/s	40.83 m^3/s	26.83 m^3/s
Flujo máximo	28.90 m^3/s	4.80 m^3/s	4.49 m^3/s	5.90 m^3/s

Los escurrimientos hídricos superficiales en el SAR, con base en la permanencia de su flujo, son temporales y solo conducen agua durante la temporada de lluvias. De acuerdo a la clasificación de cuencas para el sistema hidrológico nacional, el área donde se ubica el proyecto se encuentra dentro de la Región Hidrológica 36 Nazas - Aguanaval, Cuenca A (R. Nazas –

Torreón), subcuenca Arroyo Cuencamé. Con base en la carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VII del INEGI (2018), en el área del SAR se localizan seis tipos de vegetación (**Figura 3** , **Cuadro 5**).

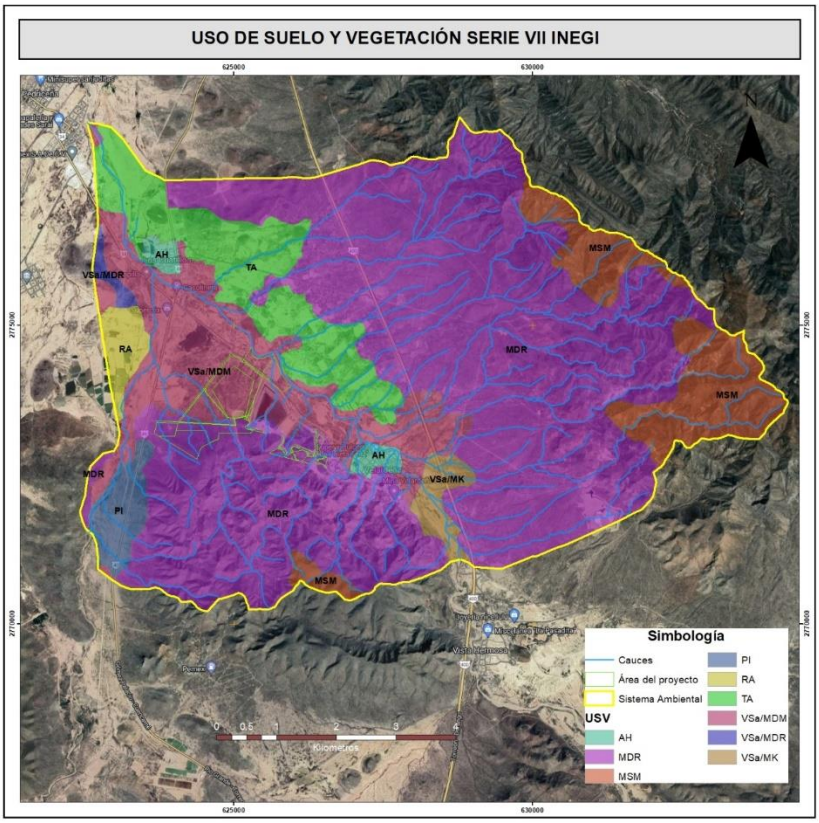

Figura 3. Uso de suelo y vegetación en el SAR de la Unidad El Roble.

Cuadro 5. Uso de suelo y vegetación en el SAR de la unidad minera El Roble. Serie VII INEGI.

Clave	Tipo de Vegetación	Sup. (Ha)	%
AH	Asentamientos Humanos	65.453	0.98
MDR	Matorral Desértico Rosetófilo	4,085.703	61.42
MSM	Matorral Submontano	592.354	8.9
PI	Pastizal Inducido	135.755	2.04
RA	Agricultura de Riego Anual	92.143	1.39
TA	Agricultura de Temporal Anual	632.849	9.51
VSa/MDM	Vegetación Secundaria Arbustiva de Matorral Desértico Micrófilo	919.798	13.83
VSa/MDR	Vegetación Secundaria Arbustiva de Matorral Desértico Rosetófilo	30.538	0.46
VSa/MK	Vegetación Secundaria Arbustiva de Bosque De Mezquite	97.532	1.47
	Total	6,652.125	100

Diseño del muestreo

Para este estudio, los sitios de muestreo se establecieron en rodales cubiertos por Matorral Desértico Rosetófilo y vegetación secundaria arbustiva de este mismo matorral, que es el tipo de vegetación de mayor cobertura dentro del SAR y es el de mayor interés por ser sobre el que se generan más impactos derivados de la actividad minera. El diseño de los sitios de muestreo con parcelas de área fija generalmente tiene un diseño circular y Schreuder *et al.* (2006) mencionan que, si el interés es sobre información ecológica, esta forma de la unidad muestral es la más adecuada. En nuestro caso, usamos esta metodología siguiendo un diseño de muestreo simple aleatorio. La distribución de las unidades muestrales dentro de los rodales seleccionados se realizó con ayuda de software GIS, utilizando la herramienta de puntos (**Figura 4**). Para el muestreo de la flora, la vegetación fue dividida en cuatro estratos, o formas de crecimiento, incluyendo árboles, arbustos, herbáceas y plantas suculentas. En el caso de la fauna, los muestreos se enfocaron en aves, mamíferos y reptiles.

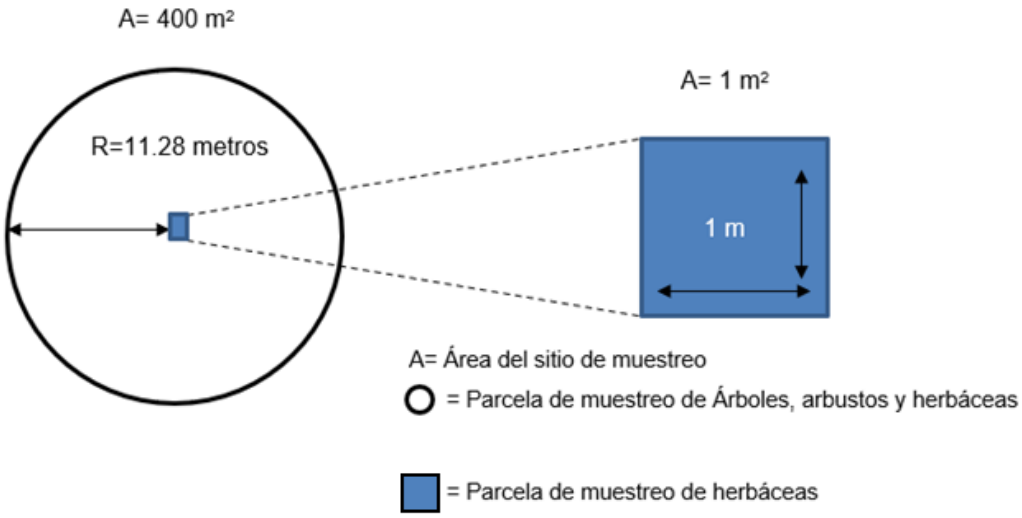

Figura 4. Forma y dimensiones de los sitios de muestreo utilizados en la unidad minera El Roble, Durango.

En los sitios circulares muestreados para la flora se identificaron las plantas a nivel de especie, indicándose también la forma de vida y el número de individuos presentes. Para la fauna, las unidades muestrales se dividieron con una red de cámaras trampa, junto con transectos y puntos de observación para reptiles, aves y mamíferos. Para identificar la flora dentro del SAR se realizó un muestro en campo en el año 2020, previo al inicio de las actividades expansión y cambio de

uso de suelo. Posteriormente, en 2024, se llevó a cabo un nuevo muestreo con un diseño muestral idéntico (Figura 4). Ambos muestreos se realizaron entre febrero y marzo.

En ambas fechas, 2014 y 2022, se establecieron 80 cuadrantes de 400 m^2 para muestrear los estratos arbóreo y arbustivo, como también plantas suculentas. En el caso del estrato herbáceo, el área de muestreo fue de 1 m^2 en el centro del sitio principal. El tamaño de la muestra (80 sitios) se definió con base en un premuestreo ejecutado en zonas con de vegetación similar, a partir del cual la inclusión de las especies encontradas fue progresiva.

Para la fauna, el muestreo consistió en 40 unidades (Cuadro 6) y se enfocó en aquellas áreas donde la probabilidad de registros era alta con base en el grupo faunístico. Estas áreas se eligieron en función de las características de la zona, tomando en cuenta el estado de conservación, la cobertura vegetal, y la disponibilidad de alimento, agua y refugio. Se utilizaron métodos directos (Gaviño *et al*., 1979) y métodos indirectos (Aranda, 2012), los que se describen a continuación.

Registros directos: Se realizarán cuando es posible observar al animal y son los más confiables porque proporcionan determinaciones precisas de las especies. Se empelaron los siguientes:

Métodos de detección en silencio. Consiste en la observación en silencio de las especies. Este tipo de registro requiere cautela, ya que sólo de esa forma el observador puede acercarse a los animales. Para el caso de las aves esta es una de las mejores técnicas para realizar observaciones y determinar las especies con ayuda de las guías de campo y cámaras fotográficas (Tessaro, 2011).

Transectos aleatorios no restringidos. En estos muestreos se intenta cubrir la mayor superficie posible sin restricción de movimiento, con la finalidad de incrementar la probabilidad de detección de las especies. Para el caso de los reptiles, es necesaria la remoción de rocas y restos vegetales (troncos, hojas y ramas) para encontrar las especies que eventualmente utilizan esos sitios para resguardarse. Durante este tipo de trabajo se usan binoculares, cámaras digitales, GPS, planos georeferenciados, guías para la determinación de las especies, redes de mano y ganchos herpetológicos (Tessaro, 2011).

Registros indirectos. En esta técnica consideraron las señales que los animales dejan por sus actividades (plumas, huellas, excretas, marcas, cadáveres, entre otros). Los rastros son

fotografiados y comparados con guías de campo para la identificación. Los recorridos se realizaron de forma aleatoria y no restringida (Tessaro, 2011).

Cuadro 6. Coordenadas de las unidades de muestreo de fauna

Transecto	UTM-X	UTM-Y	Transecto	UTM-X	UTM-Y
1	623682.95	2772852.51	21	626743.66	2771411.06
	623692.80	2772753.00		626843.66	2771411.06
2	623911.55	2772674.71	22	627035.76	2771322.16
	623989.84	2772612.49		627080.48	2771411.60
3	624108.40	2772687.41	23	627238.96	2771398.36
	624204.88	2772661.10		627337.60	2771414.80
4	623517.85	2772592.16	24	624260.80	2774033.62
	623614.01	2772564.69		624350.90	2774077.00
5	623721.05	2772522.31	25	624514.81	2774281.27
	623785.82	2772446.12		624607.36	2774319.13
6	624203.65	2772388.96	26	625344.01	2774839.27
	624298.90	2772358.49		625441.72	2774860.57
7	624165.55	2772166.71	27	626018.96	2774785.04
	624265.51	2772163.77		626079.57	2774864.58
8	624438.61	2772274.66	28	626237.25	2774791.65
	624510.94	2772343.71		626329.89	2774829.29
9	624813.26	2772496.91	29	626488.60	2775479.57
	624880.96	2772423.32		626582.34	2775444.75
10	624527.51	2772776.31	30	626997.92	2775162.07
	624610.71	2772831.78		627096.85	2775147.41
11	624787.86	2772839.81	31	627374.96	2774718.89
	624882.35	2772872.53		627372.26	2774618.93
12	625124.41	2772668.36	32	627136.83	2774553.52
	625184.41	2772588.36		627184.24	2774465.48
13	624819.61	2771741.26	33	627613.08	2774322.01
	624918.14	2771758.32		627637.34	2774225.00
14	625708.61	2771715.86	34	626898.71	2774368.32
	625614.93	2771750.85		626974.90	2774303.55
15	625600.66	2771963.51	35	627269.12	2774011.13
	625694.16	2771998.98		627367.44	2773992.84
16	625968.96	2772312.76	36	627851.21	2773733.31
	625980.42	2772412.10		627862.25	2773633.93
17	626184.86	2772446.11	37	627976.89	2773204.15
	626225.90	2772354.92		627997.28	2773106.25
18	626311.86	2772096.86	38	628181.94	2772926.33
	626411.64	2772090.21		628205.40	2772829.13
19	626661.11	2772071.46	39	626892.09	2773279.55
	626758.96	2772092.06		626807.97	2773333.63
20	626496.01	2771525.36	40	626664.55	2773855.02
	626593.83	2771546.11		626741.12	2773919.34

La información recopilada se capturó en bases de datos, las cuales se prepararon para construir las curvas de acumulación de especies. Dichas curvas mostraron que la cantidad de sitios seleccionada era suficiente para obtener estimaciones confiables de la biodiversidad.

Procesamiento de datos de campo

Con las bases de datos, se procedió a construir curvas de rarefacción, que es un método desarrollado por Sanders (1968) y corregido posteriormente por Hulbert (1971). Este método calcula el número de especies que se espera sean identificadas en el muestreo, bajo el supuesto de que todas las muestras contengan el mismo número de individuos. La incorporación de nuevas especies al inventario se relaciona con el esfuerzo de muestreo (Jiménez-Valverde & Hortal, 2003). A una mayor cantidad de réplicas, mayor número de especies registradas, donde las especies más comunes aparecerán en las primeras unidades muestrales, mientras que las especies menos abundantes van incorporándose conforme se incrementa el esfuerzo de muestreo. En este punto, la curva inicia la tendencia hacia la asíntota y, en teoría, si la pendiente de la curva tiende a cero, éste sería el número total de especies que se encuentran en la comunidad.

Los muestreos en este trabajo se realizaron bajo esta base teórica y, a partir de la unidad muestral número 40, la pendiente de la curva mostró una tendencia asintótica. Para esto, se utilizó el software EstimateS (Colwell, 2013) y, para corroborar que el esfuerzo de muestreo fue suficiente y confiable, se analizaron las curvas de acumulación de especies resultantes con métodos no paramétricos y paramétricos.

Manejo de bases de datos

El procedimiento matemático-estadístico utilizado combina las ventajas del cálculo de métricas absolutas, los intervalos de confianza y las curvas de acumulación de especies (Colwell, 2013). Se le denomina técnicas de rarefacción y se considera un procedimiento robusto y confiable a la hora de hacer comparaciones de diversidad entre comunidades. Para esto, en el momento del procesado de datos se efectuó un remuestreo aleatorio de 100 veces para cada tamaño muestral. Los datos recolectados en los sitios de muestreo, para cada año de muestreo, se usaron para estimar los valores promedio de riqueza de especies y el índice de diversidad proporcional de Shannon. Para los valores de riqueza, se obtuvieron sus intervalos de confianza al 95% para cada tamaño muestral. Además, este análisis provee información adicional sobre el valor del estimador de riqueza Chao 2, el cual indica cuantas especies pudieran haber sido omitidas en el muestreo (en número, no en identidad). Así, si la riqueza máxima observada se encuentra dentro del intervalo de confianza del estimador Chao 2, se puede asumir que el muestreo fue completo. Para la media estimada del índice de Shannon para cada tamaño muestral, también se obtiene su correspondiente

intervalo del 95% de confianza. Así, tanto para la riqueza como para el índice de Shannon, la comparación estadística de la diversidad entre dos o más sitios, o entre dos o más momentos del tiempo para un mismo sitio, se realiza determinado si los intervalos de confianza se solapan, lo que indicaría que no hay diferencias, o si bien no se solapan, lo que indicaría que hay diferencias.

Con la información de riqueza estimada y el índice de Shannon para cada tamaño muestral se procedió a calcular el índice de equidad de Pielou para cada uno de los tamaños muestrales. Para esto se empleó la siguiente ecuación:

$$E = \frac{H_{cx}}{ln * (H_{cx})}$$

donde, E es la equidad, H_{cx} es el Índice de Shannon de la comunidad X. En este caso, no se pueden calcular los intervalos de confianza debido a limitaciones del software empleado, por lo que el análisis solamente es visual. Con toda esta información ya organizada, se procedió a construir las curvas de rarefacción para llevar a cabo las comparaciones entre momentos del tiempo.

RESULTADOS

Diversidad de la flora

Se construyeron curvas de rarefacción para la riqueza de especies de plantas, donde en el eje de las abscisas indica el tamaño muestral y en el eje indica la riqueza acumulada estimada en cada tamaño muestral con su correspondiente 95% IC. Al final de estas curvas se colocaron los valores de Chao 2 con sus 95% IC. De la misma manera, se construyeron curvas de rarefacción para el índice de diversidad de Shannon y el índice de Equidad de Pielou, con la salvedad que para este último no se pudieron estimar los 95% IC por los motivos explicados anteriormente. Estos análisis se realizaron separadamente para para el estrato arbóreo, arbustivo, herbáceo y suculentas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos por forma de crecimiento.

Estrato arbóreo: Las curvas de rarefacción de la riqueza de especies de 2020 y 2024 se muestran en la figura 5. Ambas curvas presentan tendencias asintóticas en ambos momentos y los 95% IC del indicador Chao 2 se traslapan en el último valor de riqueza de las curvas. Esto indica que el esfuerzo de muestreo en ambos periodos fue suficiente para capturar la mayor parte de las especies.

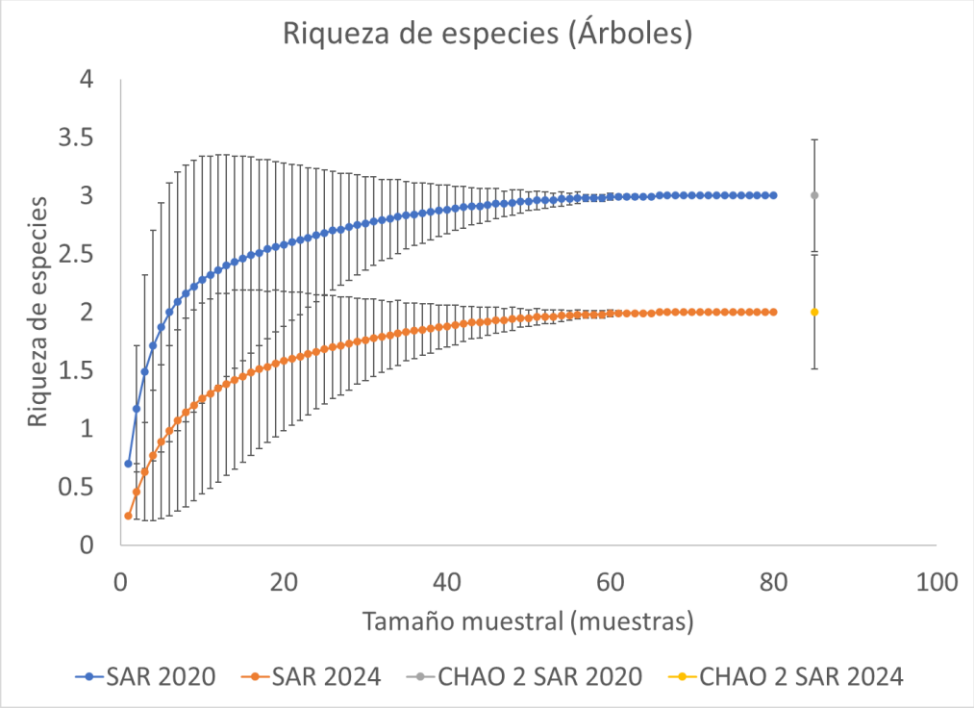

Figura 5. Curva de rarefacción de la riqueza de árboles en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

La riqueza de árboles en 2020 era superior en 2024, lo que indica un decremento en la biodiversidad a nivel de SAR en fechas posteriores a la ampliación de infraestructura. Los intervalos de confianza (95% IC) de esas curvas no se traslapan en sus asíntotas, por lo que se concluye que hay suficiente evidencia estadística para afirmar que existió un cambio en el número de especies dentro del SAR.

En cuanto al índice de diversidad proporcional de Shannon (Figura), se observa que los sus valores a altos tamaños muestrales son menores en 2024 que en 2020 y sus correspondientes 95% IC no se traslapan. Esto también indica que el estrato arbóreo presentó menor diversidad tras la ampliación de la obra.

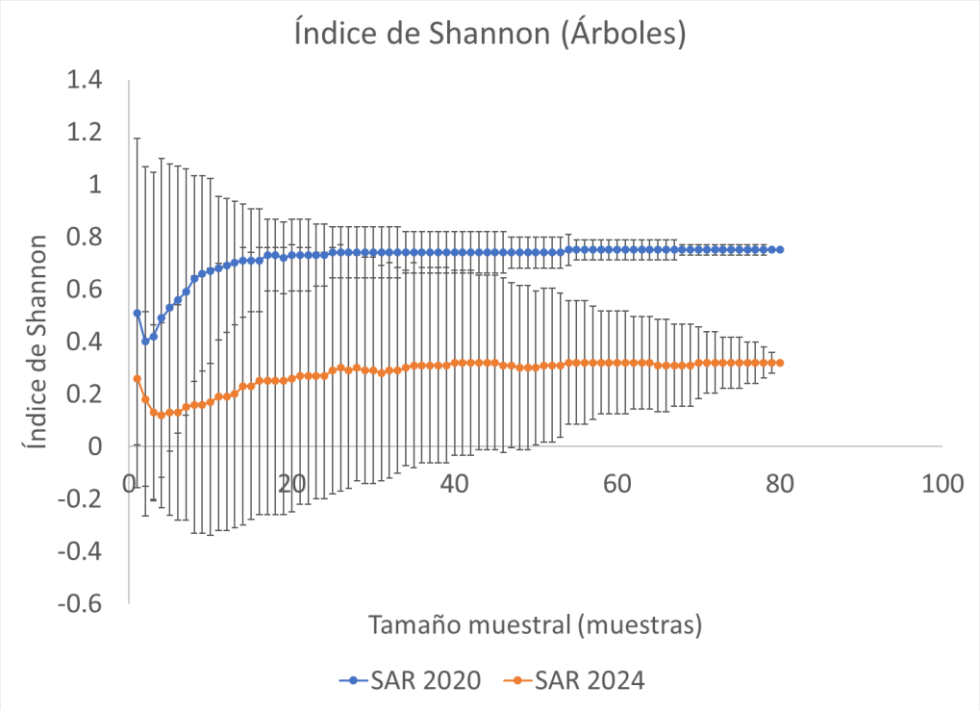

Figura 6. Curva de rarefacción del índice Shannon para árboles en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

El índice de equidad (Figura 7) muestra que en el SAR los individuos se distribuían de manera más homogénea en 2020 que en 2024. Esto indica que, en ese lapso de tiempo, se incrementó la dominancia por parte de algunas especies dentro del SAR.

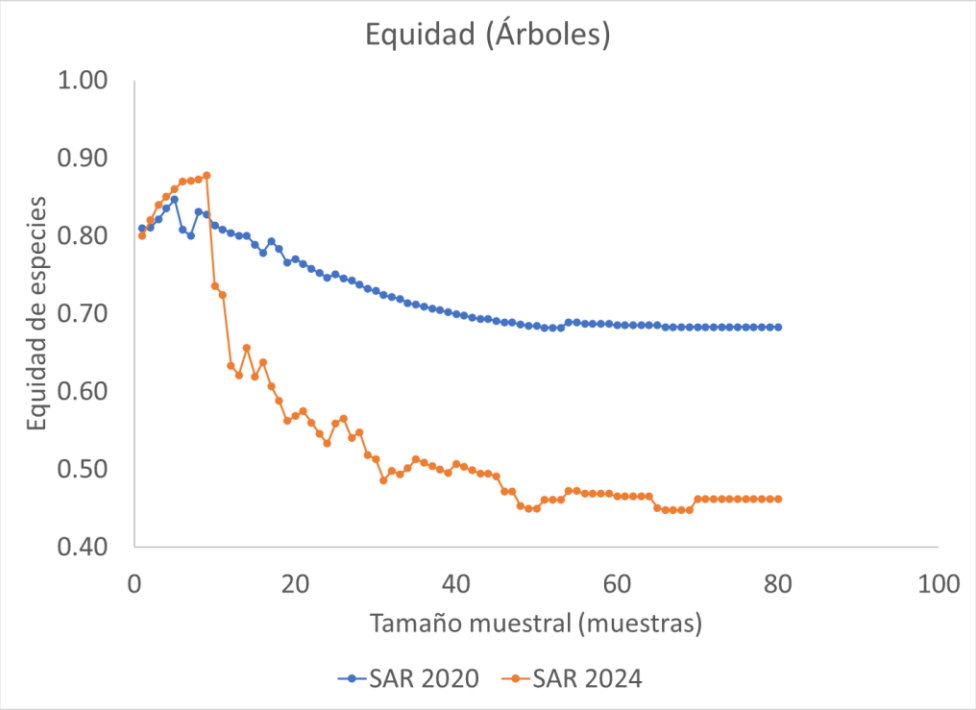

Figura 7. Curva de equidad de especies arbóreas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

Estrato arbustivo: Las curvas de rarefacción para la riqueza de especies (Figura 8) del estrato arbustivo alcanzan una asíntota, tanto en 2020 como en 2024, y los 95% IC de los índices de Chao 2 se encuentran traslapados con los del último valor de cada curva. Por lo tanto, se considera que el esfuerzo de muestreo fue representativo. Para este estrato de la vegetación, las curvas no muestran diferencias entre 2020 y 2024 porque sus 95% IC se encuentran traslapados en todos los tamaños muestrales.

El índice de diversidad proporcional de Shannon (Figura 9) muestra diferencias significativas entre años, siendo significativamente menor en 2024. Por lo tanto, hay evidencia estadística para proponer que el estrato arbustivo en el SAR ha sufrido reducciones en su diversidad de arbustos.

La equidad en el SAR fue superior en 2020 que, en 2024, loque es particularmente evidente a medida que el tamaño muestral se incrementa (Figura 10). Estos resultados permiten inferir que la dominancia de algunas especies se ha incrementado en el estrato arbustivo después de la ampliación de la infraestructura de la unidad minera.

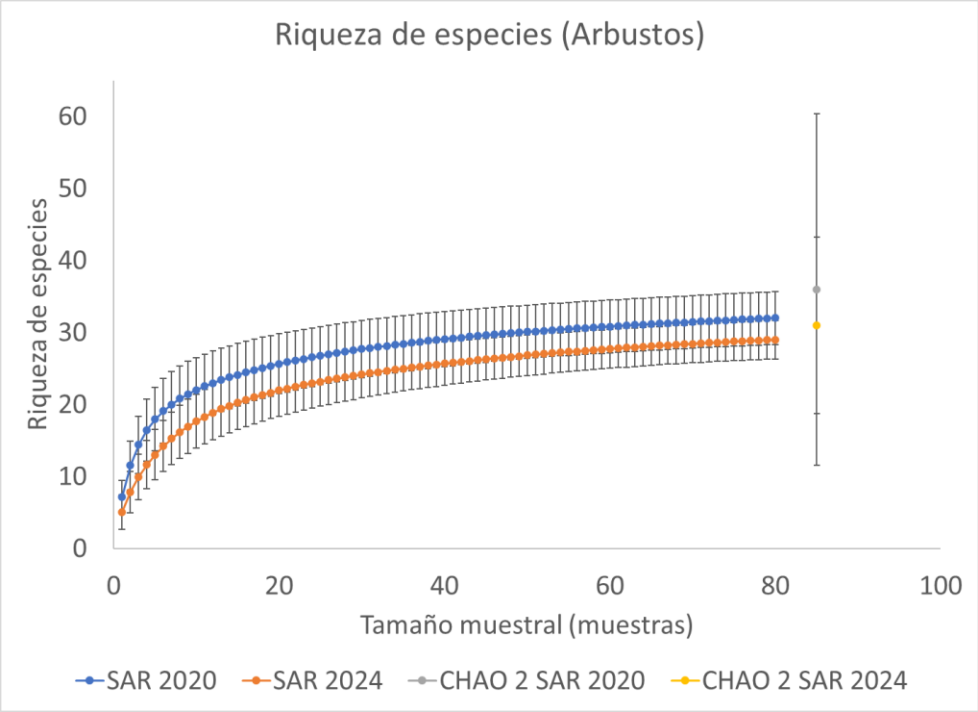

Figura 8. Curva de rarefacción de la riqueza de arbustos en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

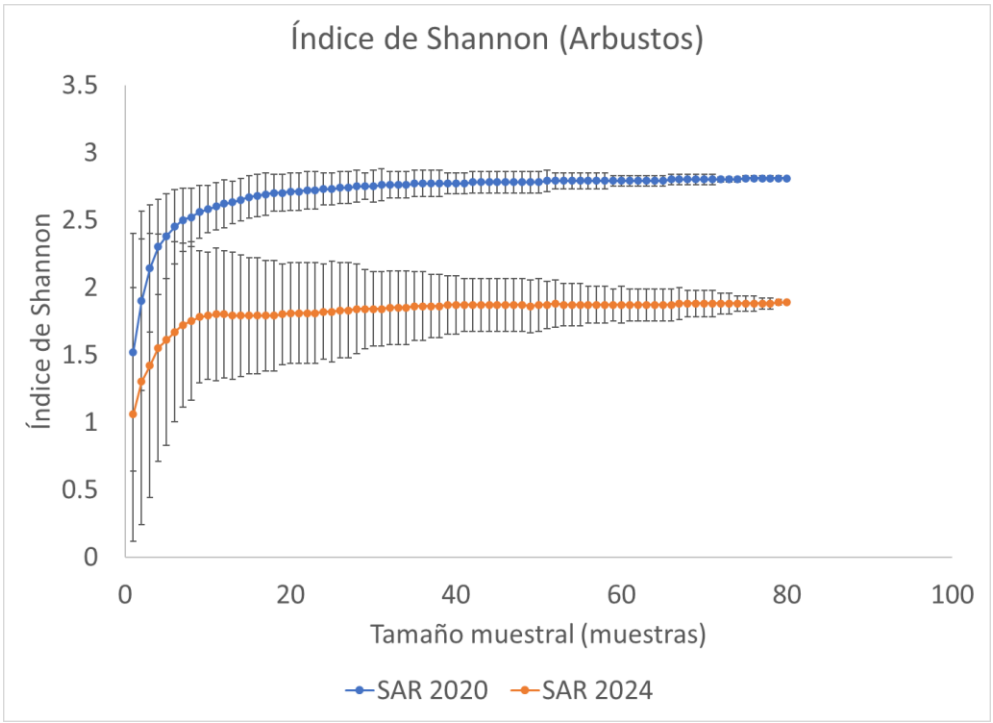

Figura 9. Curva de rarefacción del índice Shannon para arbustos en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

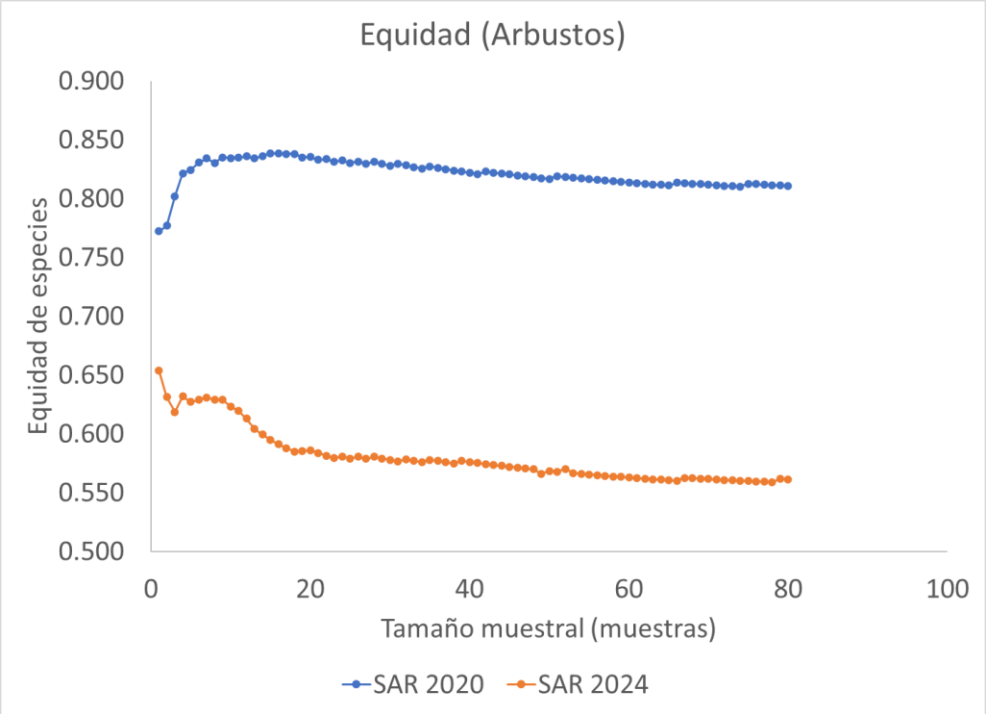

Figura 10. Curva de equidad de especies arbustivas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

Estrato herbáceo: Para este grupo de plantas, se observó una tendencia hacia la asíntota de la riqueza de especies conforme aumentó el tamaño muestral, pero esto fue más evidente en 2020 que en 2024 (Figura). No obstante, pese a ser muy amplios, los 95% IC de los valores Chao 2 para amos momentos del tiempo contienen a los últimos valores de riqueza de esas curvas. Por lo tanto, se considera que el esfuerzo de muestreo fue representativo. En este estrato de la vegetación, la riqueza de especies fue notablemente superior en 2020, con 13 especies, en comparación con las 8 especies detectadas en 2024.

En cuanto al índice de diversidad proporcional de Shannon para el estrato herbáceo (Figura), los valores de 2020 fueron mayores que en 2024. Al observar los intervalos de confianza del 95%, se puede concluir que no se superponen. Esto sugiere que existe la diversidad proporcional de herbáceas se redujo después de la ampliación de la obra.

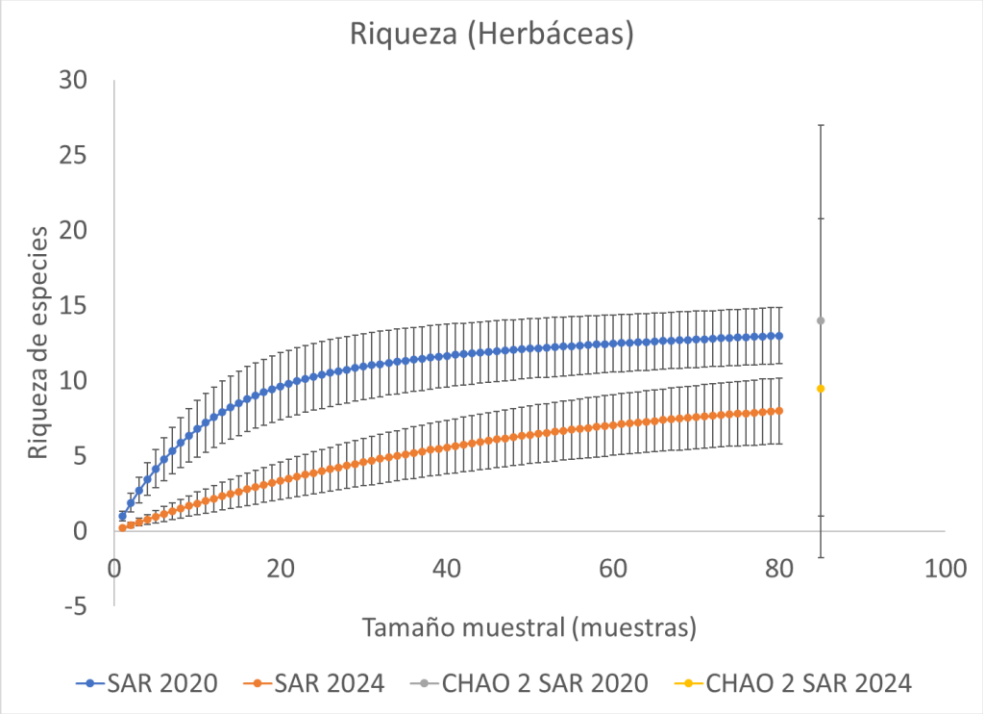

Figura 11. Curva de rarefacción de la riqueza de plantas herbáceas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

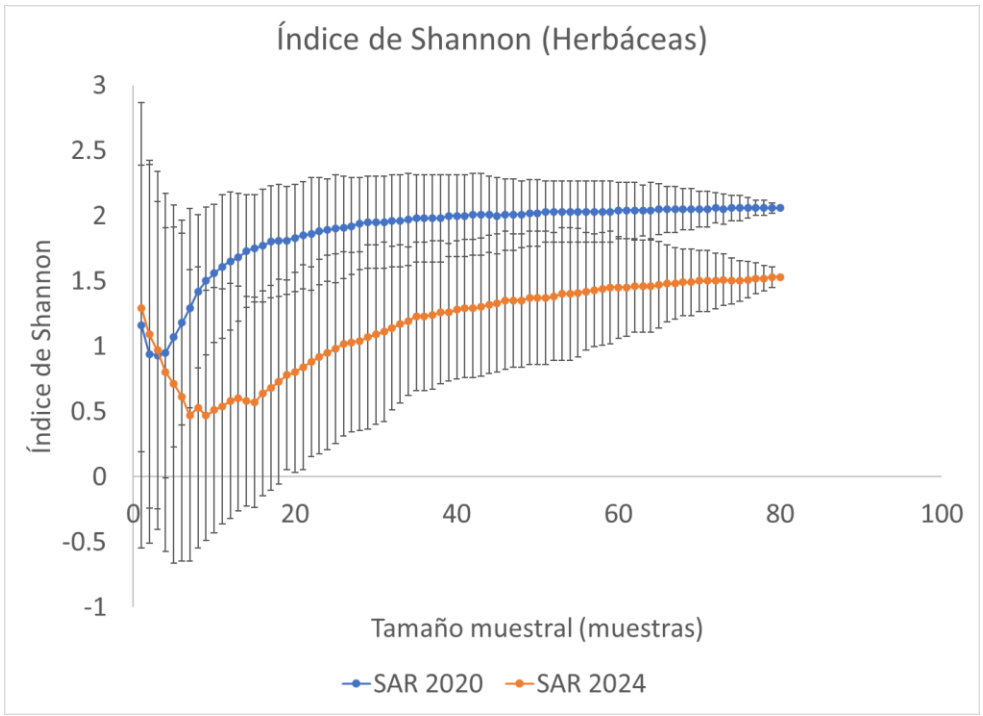

Figura 12. Curva de rarefacción del índice Shannon para plantas herbáceas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

En este punto, debido a las contradicciones entre los resultados de riqueza de especies y diversidad proporcional, la métrica de equidad (Figura 13) puede ayudar a tomar decisiones. En ese sentido, se observó que el índice de equidad de Pielou fue mayor en 2020 que en 2024, especialmente en tamaños muestrales superiores a 20 muestras. Así, en conjunto con el resto de las métricas de diversidad, se pude concluir que el estrato herbáceo fue más diverso en el 2020.

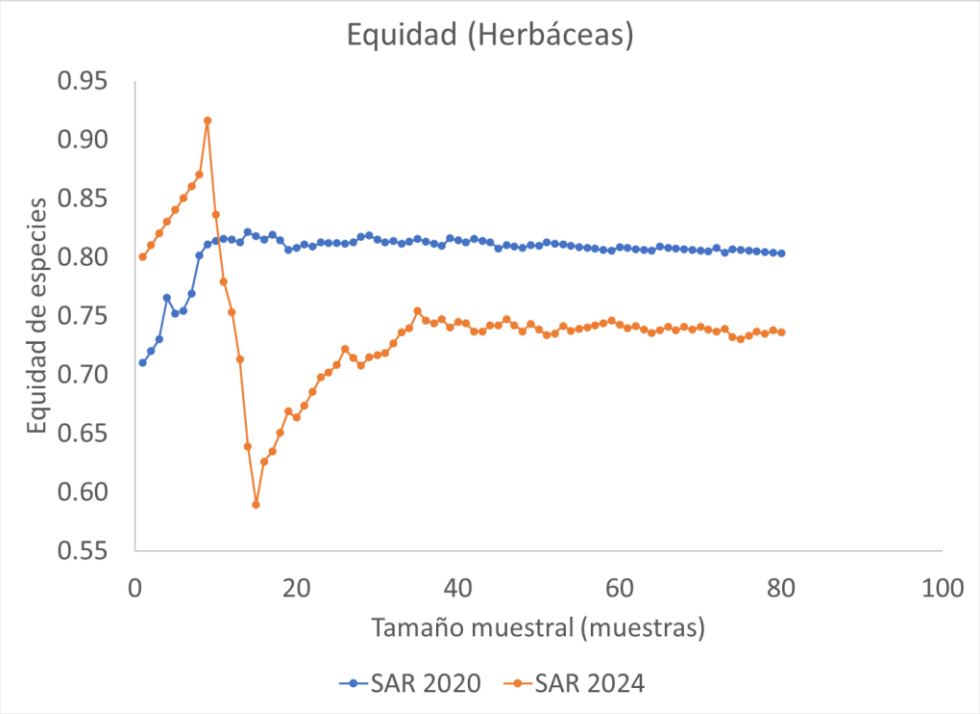

Figura 13. Curva de equidad de especies herbáceas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

Suculentas: La riqueza de plantas suculentas presentó una rápida tendencia a la asíntota conforme aumentó el tamaño muestral en ambos años (Figura 14). Sin embargo, la tendencia hacia la asíntota fue más evidente en el año 2024 que en el año 2020, lo que sugiere que había más especies por unidad de superficie antes de la ampliación de la obra. Tanto en 2020 como en 2024, los 95% IC del estimador Chao 2 se traslapan con la riqueza final de especies de esas curvas. Por lo tanto, se puede aseverar que el esfuerzo de muestreo fue representativo. Las plantas suculentas presentaron mayor riqueza en el 2020 que en 2024 y, debido a que los intervalos de confianza de esta métrica no presentan traslape en la asíntota de las curvas, se puede concluir que hay diferencias significativas entre años.

Las curvas de rarefacción para índice de diversidad proporcional de Shannon para plantas suculentas solo tienden a diferir significativamente (es decir, no hay solapamiento entre sus 95% IC) en tamaños muestrales muy altos (Figura 15). Contrario a lo reportado para la riqueza de especies, estas curvas indicaron que el año 2024 fue más diverso, en términos de plantas suculentas, que el año 2020.

En el caso de la equidad de especies, ésta fue mayor en el período de muestreo 2024 que en el período de muestreo 2020 (Figura 16). Esto indica que los individuos se distribuyeron más homogéneamente entre las especies después de la ampliación de la unidad minera, lo que explicaría también los mayores valores del índice de diversidad proporcional de Shannon en el año 2020. Esta situación puede atribuirse a que los mayores esfuerzos de conservación, protección y fomento se han enfocado en las plantas suculentas, prestándose menos atención a las otras formas de crecimiento vegetal.

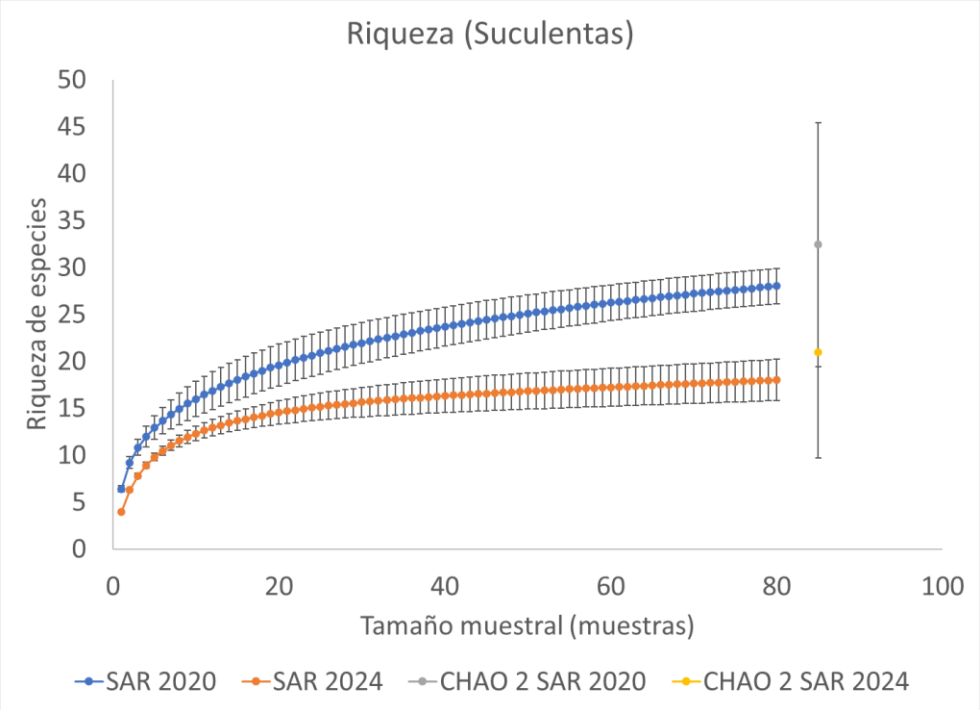

Figura 14. Curva de rarefacción de la riqueza de plantas suculentas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

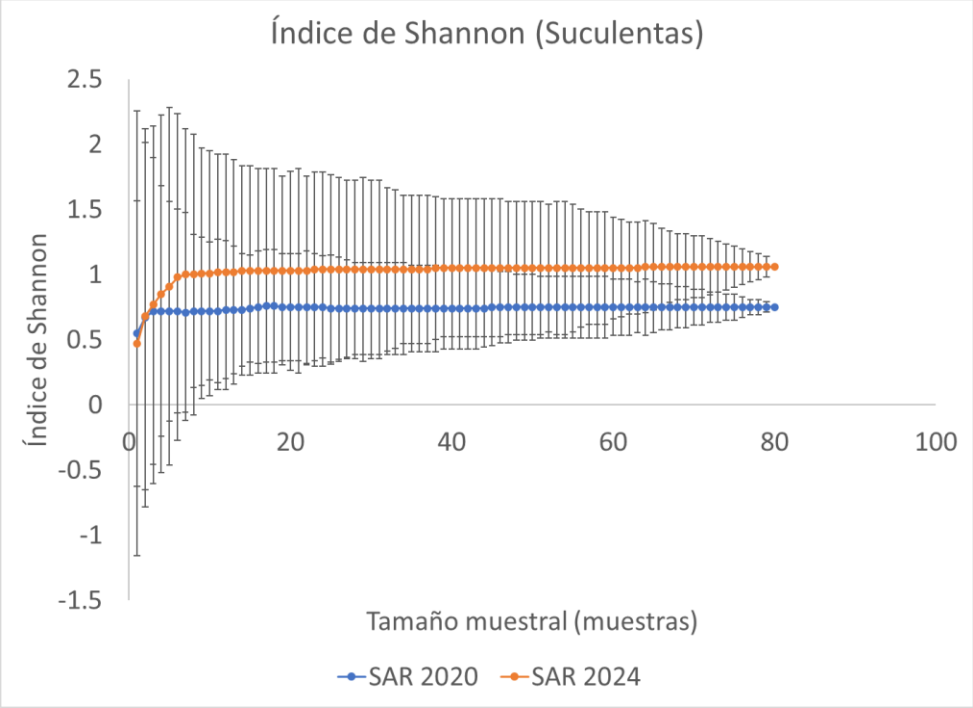

Figura 15. Curva de rarefacción del índice Shannon para plantas suculentas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

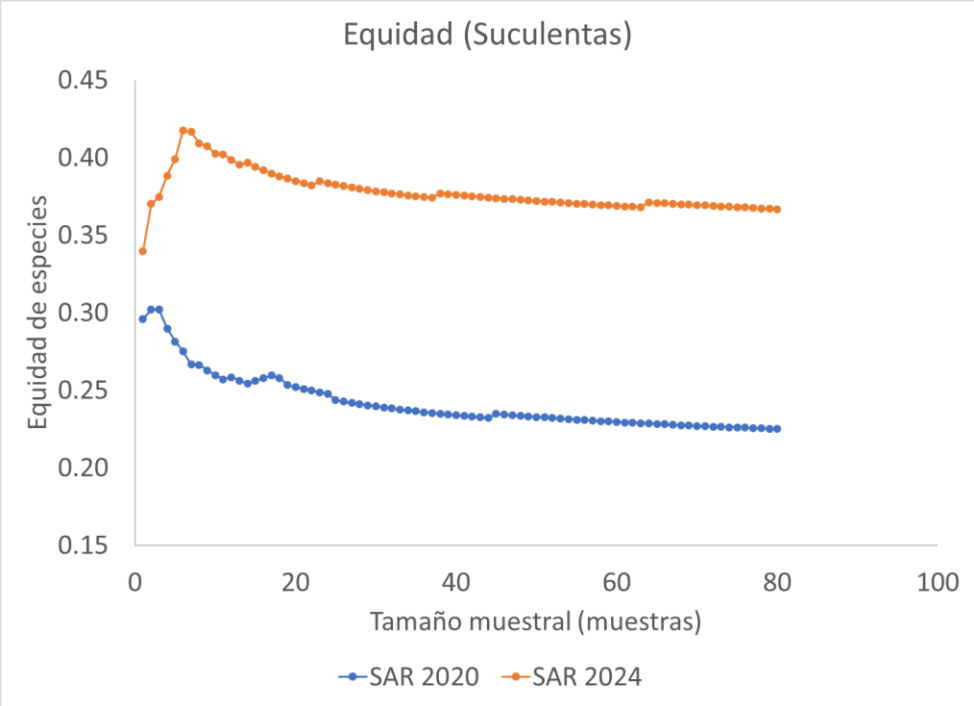

Figura 16. Curva de equidad de especies de plantas suculentas en la SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

Curvas de rarefacción para la fauna

Al igual que para la vegetación, se construyeron curvas de rarefacción para la riqueza de especies a través de los diferentes tamaños muestrales, con sus estimadores Chao 2 y sus respectivos intervalos de confianza. Igualmente, se construyeron las curvas de rarefacción para el índice de diversidad de Shannon y el índice de Equidad de Pielou. Estos análisis se presentan debajo para cada grupo faunístico.

Aves: Las curvas de rarefacción para la riqueza de aves (Figura) indica que el esfuerzo de muestreo fue aceptable para medir la diversidad de especies. Esto porque, tanto en 2020 como en 2024, las curvas tienen una tendencia asintótica que evidencia de que se capturó la mayor parte de las especies del ecosistema. Además, los 95% IC de los estimadores Chao 2 tienen un traslape con el último valor de riqueza de especies de esas curvas. Estas curvas muestran que había una mayor riqueza especifica de aves en 2020 que en 2024, sin observarse sobreposición de sus respectivos 95% IC en las asíntotas de las curvas, de esta manera, se concluye que haya diferencias significativas en la riqueza entre esos años.

En el caso del índice de diversidad proporcional de Shannon (Figura), la curva correspondiente al año 2020 tuvo valores superiores a la del año 2024. Los 95% IC al no presentaron traslapes en las asíntotas de la curva, lo que indica que el año 2020 fue más diverso que el año 2024.

Los valores de equidad a lo largo de las curvas de los años 2020 y 204 (Figura 19) no permiten definir de manera clara que un periodo haya sido más equitativo que el otro. La posible explicación para esto es que, si bien los valores de riqueza específica y del índice de diversidad proporcional bajaron en 2024, en comparación con 2020, se mantuvieron también bajos niveles de dominancia por parte de las especies.

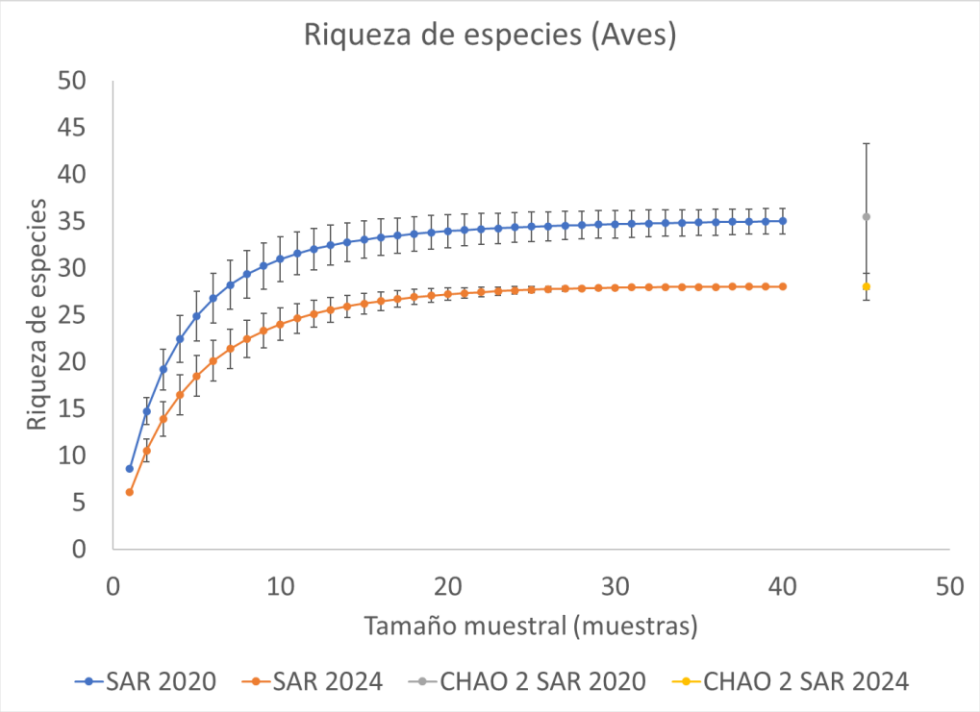

Figura 17. Curvas de rarefacción para la riqueza aves en el SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

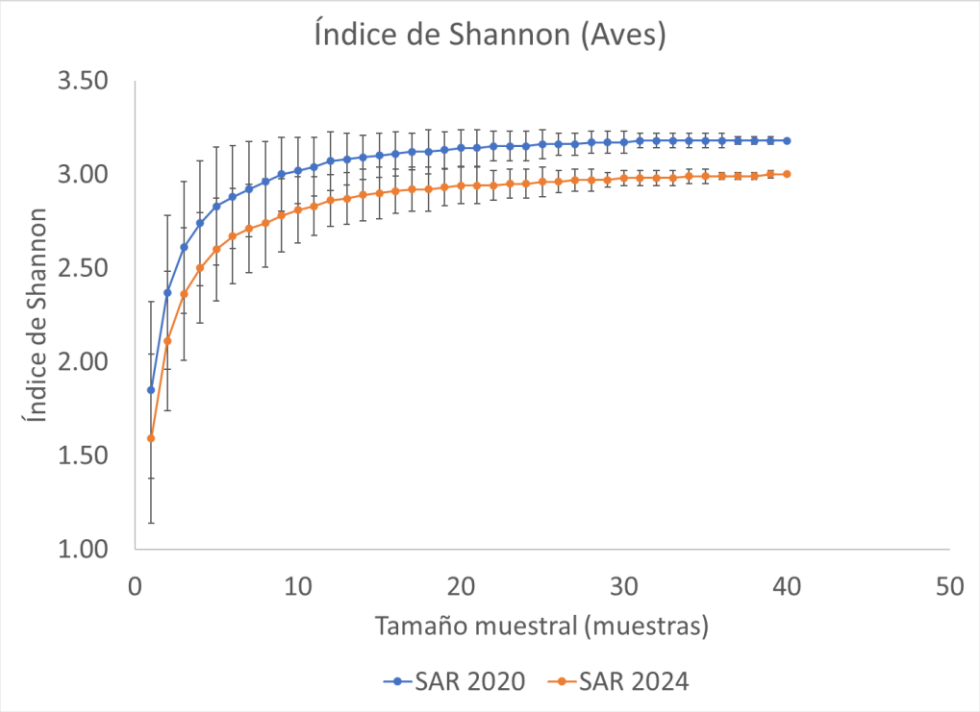

Figura 18. Curvas de rarefacción para la diversidad proporcional de aves en el SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

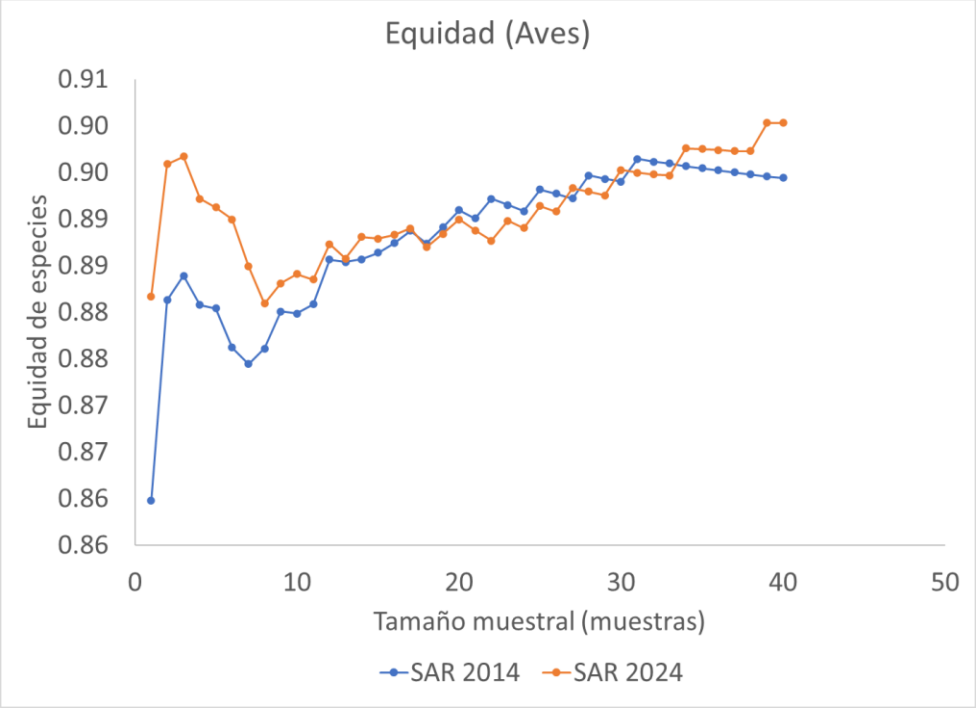

Figura 19. Curvas de rarefacción para la equidad aves en el SAR de la Unidad el Roble, Durango en los años 2020 y 2024.

Reptiles: Para este grupo taxonómico, el esfuerzo de muestreo fue suficiente para hacer evaluaciones de diversidad en 2020 y 2024. Esto porque ambas curvas tienen una tendencia asintótica y los 95% IC del de los estimadores Chao 2 contienen al último punto de las curvas respectivas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Del mismo gráfico se desprende que los reptiles presentaron mayor diversidad en 2020 que en 2024, existiendo diferencias significativas entre años porque sus 95% IC no presentan traslape.

El índice de diversidad proporcional de Shannon también mostró un cambio significativo en la diversidad entre ambos periodos de muestreo (Figura). En este caso, la diversidad de especies también fue mayor antes de que se realizara la expansión de la obre, en 2020, que después de que se produjeran los cambios en el uso del suelo, en 2024.

El análisis de equidad reveló que esta métrica de diversidad se mantuvo con valores elevados en 2020 y en 2024 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Así, no se puede aseverar que hubieran ocurrido cambios en la equidad de especies entre los dos períodos de muestreo, lo que indica que los cambios en el uso del suelo no promovieron la dominancia por parte de algunas especies de reptiles.

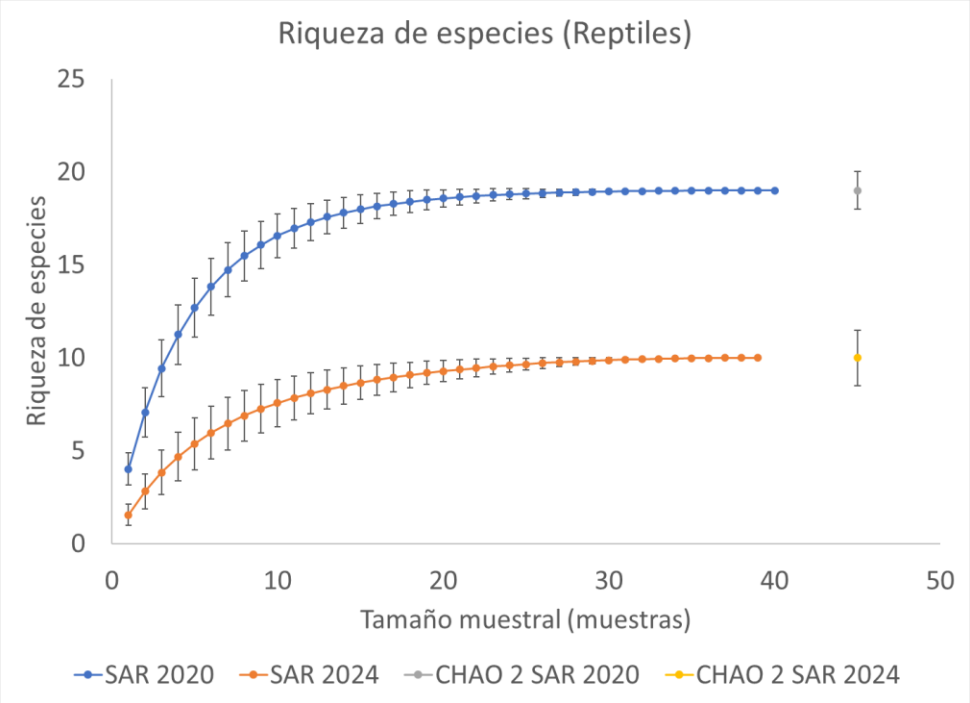

Figura 21. Curvas de rarefacción para la riqueza de reptiles en el SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

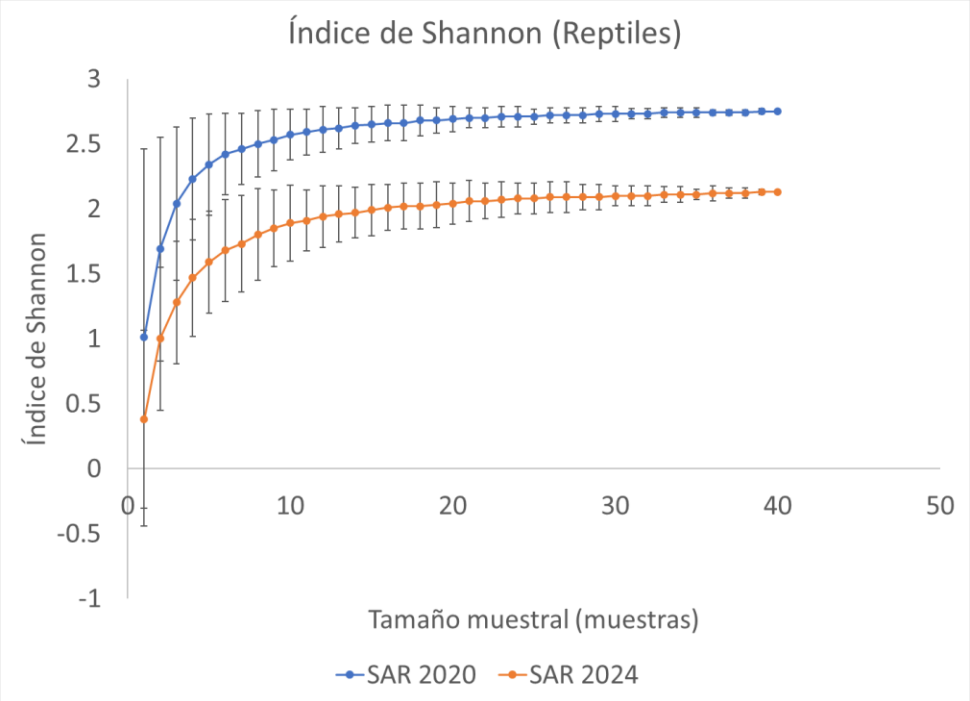

Figura 21. Curva de rarefacción índice de Shannon reptiles, para la SAR de la Unidad el Roble, Durango en los años 2020 y 2024.

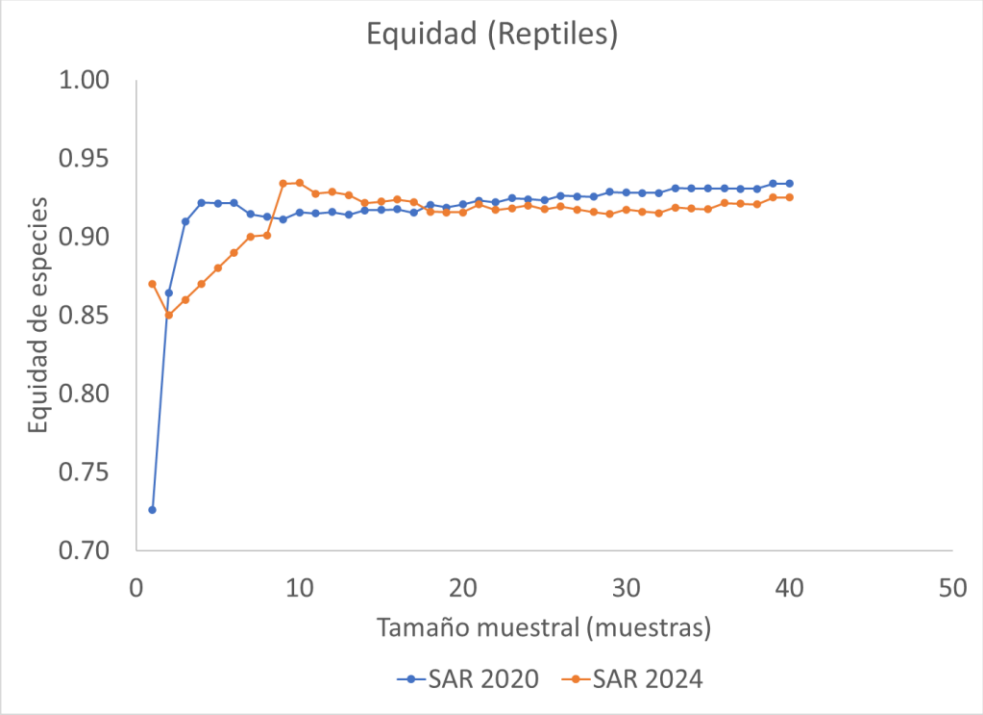

Figura 22. Curvas de rarefacción para la equidad reptiles en el SAR de la Unidad el Roble, Durango en los años 2020 y 2024.

Mamíferos: Las curvas de rarefacción construidas para mamíferos en 2020 y 2024 muestran una rápida tendencia a la asíntota (Figura) y los 95% IC de los estimadores Chao 2 respectivos se traslapan con el último valor de cada curva. Por lo tanto, se concluye que el esfuerzo de muestreo fue suficiente para capturar la mayor parte de la diversidad de mamíferos. En estas mismas curvas se observa que la riqueza de especies fue superior en 2020 que en 2024. La ausencia de solapamiento entre los 95% IC estimados en las asíntotas de esas curvas indica que la riqueza de mamíferos en el SAR disminuyó significativamente después de la ampliación de la obra.

Las curvas de rarefacción para índice de Shannon (Figura 24) muestran valores superiores en 2020, en comparación con 2024, sin haber solapamiento de los 95% IC en las asíntotas de las curvas. Por lo tanto, la diferencia en diversidad proporcional entre años de muestreo es estadísticamente significativa.

Para los mamíferos, los valores de equidad (Figura 25) mostraron diferentes tendencias entre periodos de muestreo. En este caso, el año 2020 fue más equitativo que el año 2024 y estos valores, en conjunto con los obtenidos para la riqueza de especies y el índice de Shannon, indican que los mamíferos han tenido decremento en si diversidad después de la ampliación de la obra.

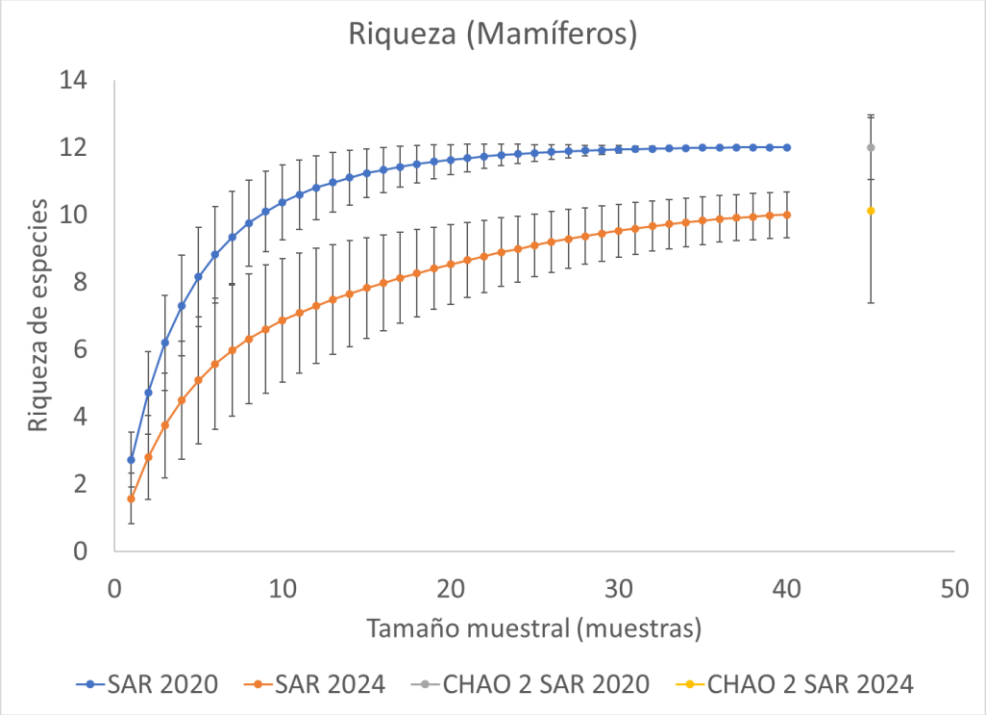

Figura 23. Curvas de rarefacción para la riqueza de mamíferos en el SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

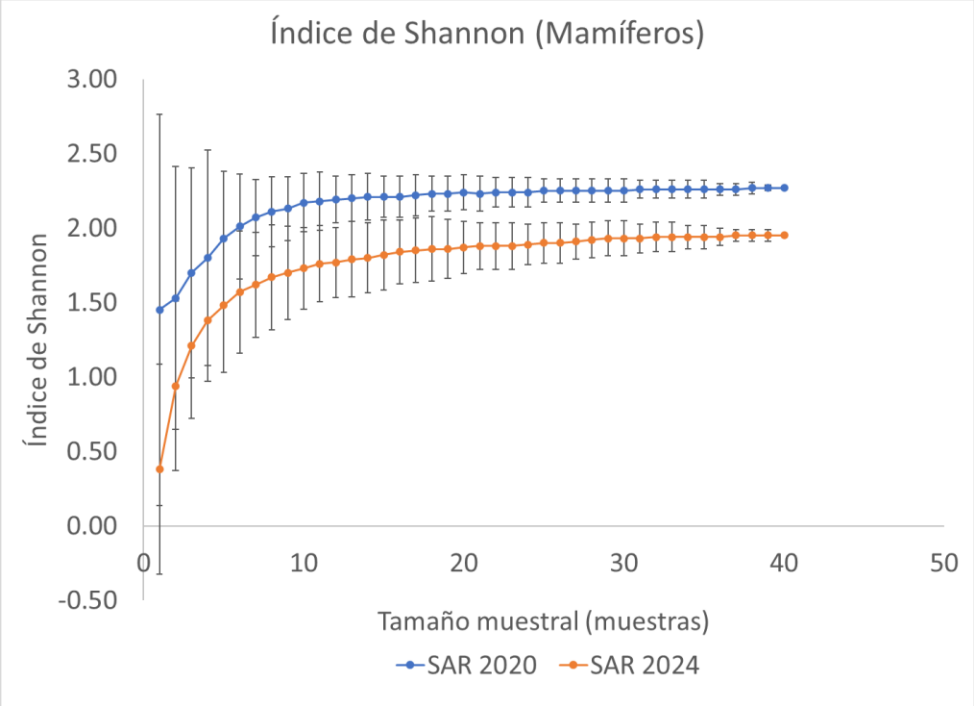

Figura 24. Curvas de rarefacción para la diversidad proporcional de reptiles en el SAR de la Unidad el Roble, Durango, en los años 2020 y 2024.

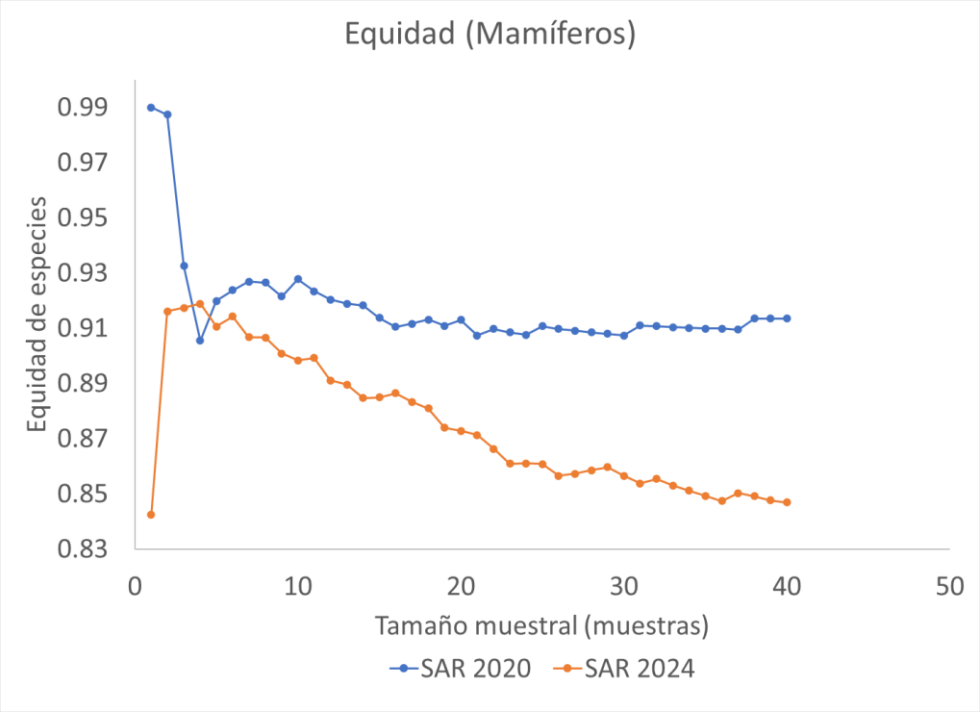

Figura 25. Curvas de rarefacción para la equidad reptiles en el SAR de la Unidad el Roble, Durango en los años 2020 y 2024.

DISCUSIÓN

Los resultados generales que se obtuvieron en este estudio, tanto para flora como para fauna, confirman la percepción general de que, en aquellos sitios y sus alrededores donde se llevan a cabo actividades de extracción y beneficio de minerales, la biodiversidad de los ecosistemas tiende a reducirse. Sin embargo, en el caso de este estudio, las plantas suculentas parecieran tener mejores condiciones para desarrollarse tras la ampliación del proyecto de la Unidad Minera el Roble. Esto porque su riqueza, diversidad proporcional y equidad fue mayor en 2024 que en 2020. No obstante, estos resultados posiblemente se deben a un sesgo de manejo sobre este grupo de plantas porque, en comparación con el resto de los estratos vegetales, los diferentes resolutivos de impacto ambiental y de cambio de uso de suelo emitidos por la SEMARNAT obligaban al proyecto a efectuar acciones de rescate y reubicación de las especies de la familia Cactaceae, que son las suculentas más comunes dentro del SAR de la Unidad Minera el Roble. En consecuencia, pese a que ocurrió una disminución en la riqueza de plantas suculentas tras la ampliación de la obra, su diversidad proporcional aumentó en 2024 y esto probablemente se debió a que las actividades de rescate, entre otras actividades de conservación que se desarrollan en el SAR, condujo a incrementos en la equidad de especies.

En cuanto a las herbáceas, que son un grupo altamente dependiente de las lluvias, cabe mencionar que enfrentaron a un período de sequía muy pronunciado en años posteriores a 2020, justo después de la toma de información en campo sobre su diversidad inicial. De esta manera, es posible que la menor riqueza, diversidad proporcional y equidad de plantas herbáceas dentro del SAR de la Unidad Minera el Roble en 2024 se hayan debido a una combinación de los efectos de la ampliación de la obra y la falta de lluvias abundantes.

El estrato arbustivo es, aparentemente, aquel sobre el cual la ampliación de la obra tuvo su menor impacto en términos de la pérdida de especies. Esto porque es el único grupo considerado en este estudio donde no se observaron reducciones en la riqueza de especies. Sin embargo, tanto la diversidad proporcional como la equidad de especies indican fuertes afectaciones negativas tras la ampliación de la obra. Posiblemente esto se debe a que estas formas de crecimiento son los principales componentes de la estructura vegetal de la zona de estudio y, en consecuencia, son aquellas en las que sobresalen los efectos negativos de las actividades de la en el SAR de la Unidad Minera el Roble en 2024. Además, a diferencia de las cactáceas, las especies arbustivas no son rescatadas y relocalizadas debido a que no presentan las características necesarias para estas

actividades, especialmente por la elevada profundidad que alcanzan sus raíces. Aunado a esto, tampoco son reproducidas en viveros para fines de revegetación, especialmente porque es difícil obtener sus semillas y hacerlas germinar. Por lo tanto, es posible que la ampliación de la Unidad Minera el roble haya afectado diferencialmente a algunas especies y reducido sus abundancias locales, a la vez que favoreció a otras especies que se tornaron altamente dominantes en la zona de estudio.

Los árboles son un estrato vegetal que está representado por unas pocas especies (no más de tres especies) que están muy dispersas en los ecosistemas que componen el SAR de la Unidad Minera el Roble y, debido a su elevada longevidad, es difícil pensar que hayan sido afectados negativamente por la ampliación de la obra. De haber sido así, en los muestreos debieron detectarse más árboles muertos en 2024 que en 2020, pero esto no ocurrió. Bajo estas consideraciones, la menor diversidad de árboles en 2024, en comparación con 2020, pudo deberse a sesgos de muestreo. Esto ocurre cuando la densidad de los individuos objeto (árboles en este caso) dentro del área de estudio es muy baja, lo que dificulta detectar a las especies que son poco abundantes en los muestreos. Así, aun cuando las curvas de rarefacción alcancen una asíntota porque las especies más comunes se han detectado, la falla en detectar a una especie poco común causa una reducción pronunciada en las métricas de diversidad, que es lo que ocurrió en 2024.

Las aves en el SAR de la Unidad Minera el Roble tienen una marcada temporalidad y, por ello, su diversidad varía entre las diferentes estaciones del año. En el caso de este estudio, los esfuerzos de muestreo se realizaron durante la temporada de lluvias, tanto en 2020 como en 2024, que es la estación donde este grupo de organismos es más abundante. La disminución en la riqueza y diversidad proporcional de aves que se observó entre 2020 y 2024 indica que el SAR no mantuvo condiciones que permitieran la permanencia completa de este grupo faunístico después de la ampliación de la obra. Esto se puede atribuir a que, dentro del SAR, ocurrieron perturbaciones que redujeron la superficie de los habitas que estas especies utilizan como refugio y fuente de alimento. No obstante, esta caída en la diversidad de aves no condujo a que unas especies lograran dominar a otras en términos de sus abundancias, ya que la equidad se mantuvo más o menos constantes entre los dos momentos que en que se realizaron los muestreos.

Para los reptiles, los valores de riqueza de especies muestran una fuerte disminución de su riqueza entre el 2020 y 2024. Este resultado es probable que se deba a la baja movilidad o territorialidad que tiene la mayoría de las especies que conforman este grupo faunístico,

característica que hace que sean muy sensibles a las alteraciones de su hábitat debido a la ampliación de la de la Unidad Minera el Roble. Sin embargo, al igual que en las aves, pareciera que esto no afectó las relaciones de dominancia al interior de este grupo de organismos, ya que la equidad de especies se fue similar antes y después de la ampliación de la obra.

De acuerdo con las estimaciones de las métricas de diversidad, el ensamble local de mamíferos también fue afectado negativamente por la expansión de la obra minera. En este grupo se observó una disminución en su riqueza, que pudiera está explicada por extinciones locales o migraciones de las especies hacia otros sitios. No obstante, también se observó una disminución en la diversidad proporcional de mamíferos. Además de la reducción en la riqueza, esto también pudiera explicarse por un incremento en la dominancia de algunas especies, loque se ve reflejado en la disminución de la equidad dentro de este grupo de vertebrados.

COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

La elaboración de este documento parte del supuesto de que, al llegar una empresa minera a una determinada área natural, debería llevar a cabo actividades encaminadas a la protección y fomento del ecosistema que la circunda. Sin embargo, las características de los estudios de impacto ambiental y cambio de uso de suelo, con sus respectivos resolutivos, enfocan sus medidas de protección y fomento a ciertos componentes puntuales del ecosistema, como es el caso de las plantas suculentas del SAR afectado. En este sentido, se puede mencionar que el Grupo Peñoles, que opera la Unidad Minera El Roble, tiene un departamento ambiental que se encarga de dar cumplimiento a las acciones de conservación, mitigación y compensación que le son impuestas, pero la autoridad debería también exigir la restauración de los ecosistemas afectados considerando no sólo se está afectando a grupos específicos de especies.

En este último aspecto, se tiene conocimiento que la Unidad Minera el Roble operas bajo los preceptos de una alta conciencia ambiental. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos encaminados a las tareas de recuperación y protección ambiental, la operación de esta unidad conduce a un detrimento en la biodiversidad de flora y fauna que la rodea. Esto plantea un reto importante en cuanto a las labores que son necesarias para mitigar y compensar los impactos ambientales

Por lo anterior se recomienda ejecutar acciones específicas que permitan la recuperación de diversidad en términos globales. En este sentido, se pudieran generar *áreas de aislamiento*, enfocadas en actividades de restauración de la flora local considerando todos los estratos vegetales. En esas áreas también debieran implementarse acciones de reducción de ruido y aprovisionamiento de nidos y madrigueras artificiales, como también bebederos, para la fauna local. De esta manera, se concluye que el departamento ambiental de la Unidad Minera El Roble debe diversificar sus esfuerzos de restauración y conservación dentro del SAR en el que opera.

LITERATURA CITADA

Agua.org.mx. (s.f.). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Recuperado de https://agua.org.mx/biblioteca/las-zonas-aridas-y-semiari-das-de-mexico-y-su-vegetacion/

Aranda, M. (2012). Manual para el rastreo de mamíferos silvestres de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO): 260

Colwell, R. K., & Elsensohn, J. E. (2014). EstimateS turns 20: statistical estimation of species richness and shared species from samples, with non-parametric extrapolation. Ecography 37(6): 609-613.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2022). Biodiversidad Mexicana. 27 p. https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/gfamilia

Gallina-Tessaro, S., & López González, C. (2011). Manual de técnicas para el estudio de la fauna. Universidad Autónoma de Querétaro e Instituto de Ecología, AC México. 390 p.

Halffter, G., J. Soberón, P. Koleff & A. Melic (eds.) 2005. Sobre Diversidad Biológica: el Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma. m3m-Monografías 3ercer Milenio, vol. 4. SEA, CONABIO, Grupo DIVERSITAS & CONACYT, Zaragoza. IV + 242 p.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI]. (2003). Estadísticas a Propósito del Día Mundial del Medio Ambiente, datos nacionales. https://paot.org.mx/centro/inegi/05junio.pdf

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2014). Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación, escala 1: 250 000 (Vectorial), Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2010). Red hidrográfica, escala 1: 50 000 (Vectorial). Edición 2.0, Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2008). Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000, Unidades climáticas, Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2008). Conjunto de datos vectoriales Edafológico, escala 1: 250 000, Serie II, Continuo nacional, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2001). Conjunto de datos vectoriales fisiográficos, escala 1: 1 0000 000, Continuo nacional serie I, Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2002). Conjunto de datos vectoriales geológicos, escala 1: 1 0000 000, Continuo nacional, Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1: 250 000. Serie VII, Conjunto nacional, Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2022). Marco Geoestadístico, vectoriales, Aguascalientes, Ags.

Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. (2003). Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos. Revista Ibérica de Aracnología (8): 151-161.

Magurran, A. E. (2004). Measuring biological diversity. African Journal of Aquatic Science 29(2): 285-286.

Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Volumen 1. Manuales y tesis SEA. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Zaragoza-España. 86 p.

Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal (Vol. 87). Santa Cruz, Bolivia: Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR) 92 p.

Peñoles. (2021). Unidad Velardeña. Recuperado de https://www.penoles.com.mx/nuestras-operaciones/unidades-mineras/velardena.html

Pielou, E. C. (1969). An introduction to mathematical ecology. Wiley-Inter-Science. New York, USA. 292 p.

Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. Interciencia 31(8): 583-590.

Schreuder, H. T., Ernst, R., & Maldonado, H. R. (2006). Técnicas estadísticas para evaluación y monitoreo de recursos naturales (No. 333.72 S2). Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales. 104 p.

SEMARNAT (2022), I. Guía para la Elaboración de la Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Regional.

Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal Topia S. C. (UCDFI Topia, 2022), Proyecto de Cambio de Uso de Suelo para el proyecto La Dura del Bajo para la UMSJ.

Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. Revista Mexicana de Biodiversidad 87(3): 559-902.

Apéndice 1. Índices de riqueza de especies propuestos para propuestos para minimizar los efectos de la abundancia de individuos.

Índice de riqueza de especies de Margalef (D_{Mg}). Este índice es de los más simples para medir la riqueza de especies e intenta compensar los efectos de muestreo dividiendo la riqueza (*S*) en el número total de individuos en la muestra (*N*) (Magurran, 2004):

$$D_{Mg} = \frac{(S-1)}{lnN}$$

Índice de Menhinick (D_{Mn}). Su fundamento es similar al índice de Margalef y se calcula con la siguiente ecuación.

$$D_{Mn} = \frac{(S)}{\sqrt{N}}$$