



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE  
HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERIA  
DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES  
(MODALIDAD TRADICIONAL)

TESIS DOCTORAL  
INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EN LOS JALES  
DE LA COMARCA MINERA DE HIDALGO

Para obtener el grado de  
Doctor en Ciencias Ambientales

Presenta  
M.A.I.A. Abraham Camacho Garza

Director  
Dr. Otilio A. Acevedo Sandoval

Comité tutorial  
Dra. Elena Ma. Otazo Sánchez  
Dra. Alma D. Román Gutiérrez  
Dra. Jesica Bravo Cadena  
Dra. Claudia Romo Gómez

Pachuca de Soto, Hgo., México, noviembre 2022



Mineral de la Reforma, Hgo. a 10 de octubre de 2022

**Número de control:** ICBI-D/1266/2022  
**Asunto:** Autorización de impresión de tesis.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al M.A.I.A. Abraham Camacho Garza, alumno del Doctorado en Ciencias Ambientales (Tradicional) con número de cuenta 415664, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "Indicadores de sustentabilidad en los jales de la Comarca Minera de Hidalgo" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dra. Elena Ma. Otazo Sánchez	
SECRETARIA	Dra. Alma Delia Román Gutiérrez	
1er VOCAL	Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval	
2do VOCAL	Dra. Claudia Romo Gómez	
1er SUPLENTE	Dra. Jesica Bravo Cadena	

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE  
 "Amor, Orden y Progreso"

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval  
 Director del ICBI



OAAS/EMOS

Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia  
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
 México. C.P. 42184  
 Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109  
 direccion\_icbi@uah.edu.mx



### **Producción científica generada:**

- Camacho-Garza, A., Acevedo-Sandoval, O. A., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., Prieto-García, F. 2022. Human Rights and Socio-Environmental Conflicts of Mining in Mexico: A Systematic Review. *Sustainability*, 14.
- Camacho Garza A., Acevedo Sandoval O. A., Otazo Sánchez E. M., Román Gutiérrez A. D., Prieto García F. 2021. “Derechos humanos y conflictos socioambientales en la minería mexicana”, *Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica A.C.* 26 y 27 de agosto del 2021. México.
- Camacho Garza A., Acevedo Sandoval O. A., Otazo Sánchez E. M., Román Gutiérrez A. D., Prieto García F. 2021. “Propuesta de indicadores de sustentabilidad urbana para el municipio de Pachuca de Soto, Hgo., México”, *Participación de la Mujer en la Ciencia.* 27-30 de septiembre del 2021. México.

## **DEDICATORIAS**

A mi bella esposa Pilar, mi compañera de vida, mis más sinceros agradecimientos por su comprensión y apoyo incondicional en cada paso recorrido en este arduo camino y por la nueva familia que ahora conformamos. Eres la mayor bendición que he podido encontrar en mi vida. Te amo.

A mis bellos hijos Leonor y Abraham Edmundo que son mi mayor logro y el regalo más grande que la vida me ha dado, a quienes siempre cuidare. Agradezco cada una de sus sonrisas y muestras de cariño que iluminan mi vida. Son la fuente de mis esfuerzos.

A mis padres Fernando y Myrna Patricia por su continua motivación para alcanzar mis metas y sus enseñanzas que me hicieron ser todo lo bueno que soy. Los quiero.

A todas aquellas personas pertenecientes al Instituto Tecnológico de Cd. Madero, El Colegio de la Frontera Norte y la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo que durante toda mi formación académica y profesional me inspiraron a alcanzar metas cada vez más altas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo puntual que permitió el desarrollo de mis estudios doctorales con el número de beca 737100.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por darme la oportunidad de continuar con mi formación académica y profesional y dejarme ser parte de su tradición estudiantil.

A mi director, el Dr. Otilio A. Acevedo Sandoval, por su apoyo incondicional, su infinita paciencia y su valioso aporte en mi formación.

A la Dra. Elena Ma. Otazo Sánchez por sus aportaciones y consejos que enriquecieron mis capacidades académicas.

A la Dra. Alma D. Román Gutiérrez por sus oportunas intervenciones que guiaron de forma acertada mi investigación.

A la Dra. Jesica Bravo Cadena por sus valiosas enseñanzas en el manejo de herramientas que formaron parte importante de mi investigación.

Al Dr. Francisco Prieto García por el tiempo dedicado durante mi doctorado y sus valiosas clases que aportaban nuevas propuestas a mi investigación.

A la Dra. Yolanda Marmolejo Santillán por su dedicación y compromiso durante el escaso tiempo que coincidimos.

## CONTENIDO

ACRONIMOS Y ABREVIACIONES .....	1
RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	4
INTRODUCCIÓN .....	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	8
1.1. GESTIÓN AMBIENTAL .....	8
1.2. DESARROLLO SUSTENTABLE.....	9
1.2.1. DESARROLLO URBANO SUSTENTABLE .....	12
1.2.1.1. ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO .....	15
1.2.2. AGENDA 2030.....	15
1.3. INDICADORES AMBIENTALES .....	17
1.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD .....	20
1.5. ¿MINERÍA SUSTENTABLE? .....	21
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES .....	23
2.1. MINERÍA INTERNACIONAL – CASO DE SUDÁFRICA .....	23
2.1.1. MINERÍA EN AMÉRICA LATINA .....	25
2.2.1. BROWNFIELDS.....	33
2.2.2.1. JALES MINEROS Y SUS RIESGOS .....	35
2.2.2.2. RIESGOS A LA SALUD HUMANA.....	37
2.3. MINERÍA DEL ESTADO DE HIDALGO .....	39
2.3.1. LA COMARCA MINERA .....	41
2.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS JALES.....	48
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS.....	54
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	54
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	54
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA .....	55
4.1. OBJETIVO 1 .....	55
4.2. OBJETIVO 2 .....	59
4.2.1. CÁLCULO DE INDICADORES .....	60
4.2.1.1. INDICADORES SOCIODEMOGRÁFICOS .....	61
4.2.1.1.1. POBLACIÓN TOTAL (S1) .....	61
4.2.1.1.2. DENSIDAD POBLACIONAL (S2).....	61

4.2.1.1.3.	COBERTURA DE SERVICIOS DE SALUD (S3).....	61
4.2.1.1.4.	ÍNDICE DE SERVICIOS URBANOS (S4) .....	62
4.2.1.1.5.	ÍNDICE DE VIVIENDAS SUSTENTABLES (S5) .....	62
4.2.1.1.6.	COBERTURA DE EDUCACIÓN EN POBLACIÓN DE 3 A 24 AÑOS (S6).....	62
4.2.1.2.	INDICADORES AMBIENTALES .....	63
4.2.1.2.1.	SUPERFICIE DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS (A1) .....	63
4.2.1.2.2.	DÉFICIT DE ÁREAS VERDES (A2).....	63
4.2.1.2.3.	SUPERFICIE FORESTAL (A3) .....	64
4.2.1.2.4.	SEGUIMIENTO DE COA REGISTRADAS (A4) .....	64
4.2.1.2.5.	DERECHO AL AGUA (VOLUMEN) (A5).....	64
4.2.1.2.6.	DERECHO AL AGUA (PRECIO) (A6).....	65
4.2.1.2.7.	EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> (A7) .....	65
4.2.1.2.8.	GENERACIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS (A8) .....	65
4.2.1.3.	INDICADORES ECONÓMICOS .....	65
4.2.1.3.1.	VALOR AGREGADO BRUTO (E1) .....	66
4.2.1.3.2.	UNIDADES ECONÓMICAS (E2) .....	66
4.2.1.3.3.	UTILIDAD (E3) .....	66
4.2.1.3.4.	TASA DE DESEMPLEO (E4) .....	66
4.2.1.4.	INDICADORES MINEROS-JALES.....	67
4.2.1.4.1.	ÁREA CONCESIONADA (M1).....	67
4.2.1.4.2.	ÁREA DE JALES URBANIZADA (M2) .....	67
4.2.1.4.3.	UNIDADES ECONÓMICAS MINERAS (M3) .....	67
4.2.1.4.4.	EMPLEABILIDAD MINERA (M4) .....	67
4.2.1.4.5.	UTILIDAD MINERA (M5) .....	68
4.3.	OBJETIVO 3 .....	68
4.4.	OBJETIVO 4 .....	72
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		75
5.1.	ANALIZAR LAS ACTIVIDADES MINERAS EN EL PERIODO 2000-2020 .....	75
5.1.1.	SUR I .....	75
5.1.2.	SUR II .....	78
5.1.3.	DOS CARLOS .....	79
5.1.4.	VELASCO I & II.....	81
5.1.5.	DISCUSIÓN FINAL (OBJETIVO 1) .....	82

5.2. SELECCIÓN DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD PARA POLÍTICAS PÚBLICAS (OBJETIVO 2) .....	83
5.2.1. INDICADORES SOCIODEMOGRÁFICOS OBTENIDOS .....	83
5.2.2. INDICADORES AMBIENTALES OBTENIDOS .....	87
5.2.3. INDICADORES ECONÓMICOS OBTENIDOS .....	94
5.2.4. INDICADORES MINEROS-JALES OBTENIDOS .....	96
5.3. EVALUAR IMPACTOS CON MATRIZ CONESA (OBJETIVO 3) .....	101
5.4. ALTERNATIVAS PARA UN MANEJO SUSTENTABLE DE JALES (OBJETIVO 4).....	104
5.4.1. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN .....	105
5.4.1.1. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SUCESIVA DE ALCALINIDAD .....	106
5.4.1.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO CON COBERTURA SECA (BARRERA CAPILAR).....	106
5.4.1.3. SISTEMA DE TRATAMIENTO CON COBERTURA SECA (BARRERA HIDRÁULICA) .....	107
5.4.1.4. MINERÍA DE TRANSFERENCIA .....	107
5.4.1.5. ZANJAS DE CORONACIÓN O CANALES COLECTORES (DRENAJE SUPERFICIAL) .....	108
5.4.1.6. CANALES CONECTORES EN ESPINA DE PESCADO (DRENAJE SUPERFICIAL) .....	108
5.4.1.7. TANQUES REACTIVOS.....	108
5.4.1.8. FITORREMEDIACIÓN (BIORREMEDIACIÓN).....	109
5.4.1.9. BIOSÓLIDOS (BIORREMEDIACIÓN) .....	110
5.4.1.10. ESTACAS VIVAS (BIOINGENIERÍA).....	111
5.4.1.11. FAJINAS VIVAS (BIOINGENIERÍA).....	111
5.4.1.12. ENMIENDA ORGÁNICA E INORGÁNICA .....	111
5.4.1.13. RECICLAJE .....	112
5.4.1.14. NEUTRALIZACIÓN CON $\text{CaO}_{(s)}$ .....	113
5.4.2. DISCUSIÓN FINAL (OBJETIVO 4) .....	113
5.5. DISCUSIÓN.....	115
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
6.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS .....	119
6.2. RECOMENDACIONES GENERALES .....	120
ANEXOS .....	122
ANEXO A.....	122
ANEXO B.....	123
ANEXO C.....	123
ANEXO D.....	124

ANEXO E .....	125
ANEXO F .....	125
ANEXO G.....	126
REFERENCIAS.....	127

## Índice de ilustraciones

<b>Ilustración 1.</b> Representación típica de la sustentabilidad .....	11
<b>Ilustración 2.</b> El Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) y su relación con el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales .....	20
<b>Ilustración 3.</b> Cantidad de conflictos mineros en América Latina.....	27
<b>Ilustración 4.</b> Procesos, residuos y amenazas potenciales de la minería metálica.....	32
<b>Ilustración 5.</b> Ilustración conceptual de las rutas del destino de las emisiones relacionadas con la minería de metales pesados y metaloides en el medio ambiente.....	36
<b>Ilustración 6.</b> Medios de exposición de los jales .....	38
<b>Ilustración 7.</b> Manejo integral de jales.....	39
<b>Ilustración 8.</b> Zonas mineras del estado de Hidalgo .....	40
<b>Ilustración 9.</b> Municipios que conforman la Comarca Minera de Hidalgo.....	42
<b>Ilustración 10.</b> Localización en el distrito minero Pachuca – Real del Monte, las presas de jales Omitlán, Dos Carlos, Sur I y Sur II, estado de Hidalgo .....	44
<b>Ilustración 11.</b> Orto imagen 1 de la zona de estudio, 1982.....	56
<b>Ilustración 12.</b> Orto imagen 2 de la zona de estudio, 1982.....	57
<b>Ilustración 13.</b> Orto imagen 3 de la zona de estudio.....	58
<b>Ilustración 14.</b> Procedimiento implementado para la obtención de información .....	59
<b>Ilustración 15.</b> Procedimiento implementado para selección de indicadores .....	60
<b>Ilustración 16.</b> Procedimiento seguido para la revisión sistemática de información .....	73
<b>Ilustración 17.</b> Exposición del talud de la presa Sur I .....	76
<b>Ilustración 18.</b> Exposición del talud de la presa Sur I .....	76
<b>Ilustración 19.</b> Presa Sur I (1995).....	77
<b>Ilustración 20.</b> Presa Sur I (2000).....	77
<b>Ilustración 21.</b> Presa Sur I (2005).....	78
<b>Ilustración 22.</b> Presa Sur II .....	79
<b>Ilustración 23.</b> Presa Dos Carlos.....	80
<b>Ilustración 24.</b> Presa Dos Carlos.....	80
<b>Ilustración 25.</b> Canchas deportivas sobre presa Dos Carlos .....	81
<b>Ilustración 26.</b> Presas Velasco I & II .....	81
<b>Ilustración 27.</b> Área Natural Protegida de la Comarca Minera.....	89
<b>Ilustración 28.</b> Superficie forestal en la Comarca Minera (2020).....	91
<b>Ilustración 29.</b> Área bajo concesión minera en municipios de la Comarca Minera.....	97
<b>Ilustración 30.</b> Vista de la Comarca Minera en el Inventario Homologado Preliminar de Jales (consultado el 2 de mayo del 2022) .....	116

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Los principales factores que dieron forma al discurso del desarrollo .....	10
<b>Tabla 2.</b> Principales sucesos en relación a lo ambiental.....	10
<b>Tabla 3.</b> Ecosistema urbano vs. Ecosistema natural.....	14
<b>Tabla 4.</b> Objetivos del Desarrollo Sustentable .....	16
<b>Tabla 5.</b> Criterios para seleccionar indicadores ambientales según la OCDE.....	18
<b>Tabla 6.</b> Conjunto de indicadores ambientales.....	19
<b>Tabla 7.</b> Características de la contaminación minera .....	32
<b>Tabla 8.</b> Beneficios ambientales, sociales y económicos asociados a la regeneración de brownfields .....	34
<b>Tabla 9.</b> Problemas de sustentabilidad en la gestión de jales .....	37
<b>Tabla 10.</b> Efectos de metales pesados en la salud humana.....	39
<b>Tabla 11.</b> Listado de geositos del Geoparque Comarca Minera, Hidalgo (UTM Zona 14. WGS84) .....	43
<b>Tabla 12.</b> Distribución de peso de material en cada escombrera.....	46
<b>Tabla 13.</b> Referencias sobre caracterización de los jales .....	49
<b>Tabla 14.</b> Caracterización química de la presa Dos Carlos. ....	50
<b>Tabla 15.</b> Caracterización química de la presa Dos Carlos (continuación).....	51
<b>Tabla 16.</b> Caracterización química de la presa Sur I. ....	52
<b>Tabla 17.</b> Caracterización química de la presa Sur II.....	53
<b>Tabla 18.</b> Termómetro del Índice de Sustentabilidad.....	60
<b>Tabla 19.</b> Dificultades para la consecución de una metodología standard para la Evaluación de Impacto Ambiental.....	68
<b>Tabla 20.</b> Matriz Importancia Valoración .....	70
<b>Tabla 21.</b> Valoración de la matriz de importancia .....	71
<b>Tabla 22.</b> Componentes ambientales.....	72
<b>Tabla 23.</b> Características de los jales de la Comarca Minera .....	82
<b>Tabla 24.</b> Población total (S1).....	84
<b>Tabla 25.</b> Densidad poblacional (S2) .....	85
<b>Tabla 26.</b> Cobertura de Servicios de Salud (S3).....	85
<b>Tabla 27.</b> Índice de Servicios Urbanos (S4).....	86
<b>Tabla 28.</b> Índice de Viviendas Sustentables (S5) .....	87
<b>Tabla 29.</b> Cobertura de educación en población de 3 a 24 años (S6).....	87
<b>Tabla 30.</b> Porcentaje de superficie de Área Natural Protegida (A1) .....	88
<b>Tabla 31.</b> Déficit de áreas verdes (A2).....	90
<b>Tabla 32.</b> Porcentaje de superficie forestal (A3) (elaboración propia).....	90
<b>Tabla 33.</b> Seguimiento de COA registradas (A4).....	91
<b>Tabla 34.</b> Derecho al agua (volumen) (A5).....	92
<b>Tabla 35.</b> Derecho al agua (precio) (A6).....	93
<b>Tabla 36.</b> Emisión de CO <sub>2</sub> (A7) .....	94
<b>Tabla 37.</b> Generación per cápita de residuos (A8) (elaboración propia).....	94
<b>Tabla 38.</b> Valor Agregado Bruto (E1).....	95
<b>Tabla 39.</b> Unidades Económicas (E2) .....	95
<b>Tabla 40.</b> Utilidad (E3).....	96

<b>Tabla 41.</b> Tasa de desempleo (E4) (elaboración propia).....	96
<b>Tabla 42.</b> Área concesionada (M1) .....	98
<b>Tabla 43.</b> Área de jales urbanizada (M2) .....	98
<b>Tabla 44.</b> Unidades Económicas Mineras (M3) (elaboración propia).....	99
<b>Tabla 45.</b> Empleabilidad minera (M4) .....	99
<b>Tabla 46.</b> Utilidad minera (M5) .....	100
<b>Tabla 47.</b> Cálculo del IS'' .....	100
<b>Tabla 48.</b> Matriz Conesa (elaboración propia).....	101

## **Índice de ecuaciones**

<b>Ecuación 1.</b> Tasa de crecimiento.....	61
<b>Ecuación 2.</b> Densidad de población. ....	61
<b>Ecuación 3.</b> Cobertura de Servicios de Salud.....	61
<b>Ecuación 4.</b> Índice de Servicios Urbanos.....	62
<b>Ecuación 5.</b> Índice de Viviendas Sustentables .....	62
<b>Ecuación 6.</b> Porcentaje población de 3 a 24 años con educación.....	63
<b>Ecuación 7.</b> Áreas Naturales Protegidas.....	63
<b>Ecuación 8.</b> Cálculo del Déficit de Áreas Verdes .....	63
<b>Ecuación 9.</b> Superficie forestal.....	64
<b>Ecuación 10.</b> Seguimiento de COA's registradas.....	64
<b>Ecuación 11.</b> Derecho al agua (volumen).....	64
<b>Ecuación 12.</b> Derecho al agua (precio).....	65
<b>Ecuación 13.</b> Emisión de CO <sub>2</sub> . ....	65
<b>Ecuación 14.</b> Generación Per Cápita de Residuos.....	65
<b>Ecuación 15.</b> Valor Agregado Bruto. ....	66
<b>Ecuación 16.</b> Utilidad. ....	66
<b>Ecuación 17.</b> Tasa de Desempleo.....	67
<b>Ecuación 18.</b> Cálculo de la importancia de los impactos ambientales .....	69

## ACRONIMOS Y ABREVIACIONES

AC: Acumulación o efecto de incremento progresivo.	EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental).
AAS: Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometría de Absorción Atómica).	EPA13-12: method synthetic precipitation leaching procedure (método de procedimiento de lixiviación por precipitación sintética). Método implementado por la EPA, diseñado para determinar la movilidad de analitos en líquidos, suelos y desechos
ANP: Área Natural Protegida.	EPT: Elemento Potencialmente Tóxico.
Ag: Plata.	EU: Estados Unidos.
As: Arsénico.	EX: Extensión o área de influencia del impacto.
Au: Oro.	FV: Flota vehicular.
bil: band interleaved by line (banda intercalada por línea).	GP: Gobierno de Pachuca.
C: Carbono.	GPCR: Generación Per Cápita de Residuos.
CAASIM: Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales.	I: Ingreso.
CBCAT (EU-MEX): Centro Binacional Estados Unidos-México para Ciencias Ambientales y Toxicología.	ICMM: International Council of Minerals and Mining (Consejo Internacional de Minería y Metales).
Cd: Cadmio.	ICP: Inductively Coupled Plasma (Espectrometría de plasma de inducción acoplada).
CE: Constante de Emisión.	IDEA: Infraestructura de Datos Espaciales Abiertos.
CI: Consumo Intermedio.	IM: Importancia del impacto.
CMAAD: Consumo Mínimo Anual de Agua Doméstica.	IMIP: Instituto Municipal de Investigación y Planeación.
COA: Cédula de Operación Anual.	IN: Intensidad del impacto.
CONASAMI: Comisión Nacional del Salario Mínimo.	INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
CPDR: Cantidad Promedio Diaria de Residuos.	INEGI-BI: Banco de Indicadores del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
CSS: Cobertura de Servicios de Salud.	IS: Índice de Sustentabilidad del indicador.
DAP: Derecho al agua (precio).	IS': Índice de Sustentabilidad del ámbito.
DAV: Déficit de Áreas Verdes.	IS'': Índice de Sustentabilidad total.
DAvol: Derecho al agua (volumen).	ISO 14001: International Organization of Standardization (Organización Internacional de Estandarización), Norma internacional para Sistemas de Gestión Ambiental.
DGEIA: Dirección General de Estadística e Información Ambiental.	
DP: Densidad de Población.	
E: Egreso.	
EDS: Energy Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X).	
EF: Efecto (tipo directo o indirecto).	
EJA: Environmental Justice Atlas (Atlas de Justicia Ambiental).	
ELI: Environmental Law Institute (Instituto de Derecho Ambiental).	

ISU: Índice de Servicios Urbanos.  
 IUMS: Índice Urbano/Minero de Sustentabilidad.  
 IVS: Índice de Viviendas Sustentables.  
 LGEEPA: Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental.  
 LGPGIR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.  
 LM: Ley Minera.  
 MC: Recuperabilidad o grado posible de reconstrucción por medios humanos.  
 MIA: Manifiesto de Impacto Ambiental.  
 MMSD: Mining, Minerals and Sustainable Development (Proyecto Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable).  
 Mn: Manganeso.  
 MO: Momento o tiempo entre la acción y la aparición del impacto.  
 MP: Millones de pesos mexicanos.  
 N: Naturaleza del impacto ( $\pm$ ).  
 Ni: Níquel.  
 NOM: Norma Oficial Mexicana.  
 NOM-053-ECOL: que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.  
 OCMAL: Observatorio de Conflictos Mineros en América Latina.  
 ODS: Objetivos de Desarrollo Sustentable  
 OECD: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.  
 OMS: Organización Mundial de la Salud.  
 ONU: Organización de las Naciones Unidas.  
 P: Promedio.  
 Pb: Plomo.  
 PE: Persistencia o permanencia del efecto provocado por el impacto.  
 PEA: Porcentaje de población de 12 años y más económicamente activa.  
 PEAD: Población Económicamente Activa Desocupada.  
 PIB: Producto Interno Bruto.  
 PNUD: Programa de las Naciones Unidas por el Desarrollo.  
 PNUMA: Programa de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente.  
 PPE.3-5: Promedio de Población de 3 a 5 años con Educación.  
 PPE.6-11: Promedio de Población de 6 a 11 años. con Educación  
 PPE.12-14: Promedio de Población de 12 a 14 años con Educación.  
 PPE.15-24: Promedio de Población de 15 a 24 años con Educación.  
 PPE.3-24: Promedio de Población de 3 a 24 años con Educación.  
 PR: Periodicidad.  
 PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (Elementos de informe preferidos para revisiones sistemáticas y metaanálisis).  
 PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.  
 PT: Población Total.  
 RAE: Real Academia de la Lengua Española.  
 RETC: Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes.  
 RPDA: Registro Público de Derechos de Agua.  
 RV: Reversibilidad del impacto.  
 Sb: Antimonio.  
 SBRP: Summer Biomedical Research Program (Programa de Verano de investigación biomédica).  
 SCR: Seguimiento de COA's registradas.  
 SD: Sin Datos.  
 SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social.  
 SE: Secretaría de Economía.  
 SEMARNAP: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesqueros.  
 SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.  
 SF: Superficie forestal.  
 SGM: Servicio Geológico Mexicano.  
 shp: shape (capa).

SI: Sinergia o reforzamiento de dos o más efectos simples.

SIAV: Superficie Ideal de Áreas Verdes.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

SISCO: Sistema de Sitios Contaminados.

SM: Salario Mínimo.

SMA: Salario Mínimo Anual.

SNIA: Sistema Nacional de Indicadores Ambientales.

SNIARN: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.

SWEHSC: Southwest Environmental Health Sciences Center (Centro de Ciencias de la Salud Ambiental del Suroeste en Tucson, Arizona, Estados Unidos).

TA: Tarifa de agua más alta del año.

TC: Tasa de Crecimiento.

TE: Tasa de Desempleo.

TCOA: Total de COA's registradas.

U: Utilidad.

UA: University of Arizona (Universidad de Arizona).

UACh: Universidad Autónoma de Chihuahua.

UAEH: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

UE: Unión Europea.

UES: Unidades Económicas.

UIP: Unidades de Importancia.

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).

VA: Viviendas con servicios de agua.

VAB: Valor Agregado Bruto.

VADC: Volumen de Agua Doméstica Concesionada.

VBP: Valor Bruto de la Producción.

VC: Viviendas con calentador solar de agua.

VD: Viviendas con drenaje.

VE: Viviendas con energía eléctrica.

VF: Viviendas con focos ahorradores.

VP: Viviendas con panel solar.

VR: Viviendas que separan residuos.

XRD: X-ray Diffraction (Difracción de Rayos X).

XRF: X-ray Fluorescence (Fluorescencia de rayos X).

%cre: porcentaje de crecimiento del indicador.

%inf: porcentaje de información del indicador.

## **RESUMEN**

La minería del estado de Hidalgo se ha llevado a cabo desde hace más de 500 años. Por ello, el crecimiento y desarrollo urbano inevitablemente han interactuado con el sector minero, en donde las instalaciones mineras y los jales se han convertido en objetivo de los desarrolladores urbanos. En los municipios de la Comarca Minera de Hidalgo, se observó la reducción en la superficie de los jales en el periodo 2000-2020, mostrando que la urbanización ha sido la estrategia implementada para mitigar el riesgo de dispersión de Elementos Potencialmente Tóxicos. Debido a ello, es necesario considerar los indicadores de sustentabilidad seleccionados como línea base para proponer políticas públicas orientadas a mejorar el marco normativo de la minería. La aplicación de la metodología de evaluación de impacto ambiental CONESA permitió definir los criterios de mayor importancia. Sin embargo, no es recomendable su aplicación en la zona de estudio si únicamente se considera la etapa “desarrollo urbano post minero”. Entre las diversas estrategias de remediación a los jales mineros, destacan las técnicas de revegetación. Dicha investigación muestra la necesidad de unificar los indicadores con la finalidad de permitir su desagregación en los distintos niveles.

## **ABSTRACT**

Mining in Hidalgo state has been carried out for more than 500 years, so urban growth and development have inevitably interacted with the mining sector, where mining tailings have become the target of urban developers. In the municipalities of the Hidalgo Mining Region, the reduction of tailings area was observed in the period 2000-2020, showing that urbanization has been the strategy implemented to mitigate the risk of Potentially Toxic Elements dispersion. Hence, it is necessary to consider the selected sustainability indicators as a baseline for proposed public policies to improve the regulatory mining framework. The thesis performed the CONESA environmental impact assessment methodology to define the most important criteria. However, its application in the study area is not recommended if only the "post-mining urban development" stage is considered. Among the various remediation strategies for mining tailings, revegetation techniques stand out. This research shows the need to unify the indicators to allow their disaggregation at different levels.

# INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EN LOS JALES DE LA COMARCA MINERA DE HIDALGO

*M.A.I.A. Abraham Camacho Garza*

## INTRODUCCIÓN

Históricamente, la minería ha sido un sector económico que es considerado como el motor o piedra angular del crecimiento económico a nivel global. Las tendencias extractivistas se han orientado a la maximización de beneficios de la industria minera para satisfacer las necesidades de la creciente población. Esta tendencia ha llevado a la generación de residuos mineros en grandes cantidades, muchas veces no sujetos a un programa de gestión integral o una economía circular que les asigne algún valor monetario (Xu et al., 2019).

Debido a que los recursos extraídos en la industria minera son limitados, el eventual cierre de sus actividades es inevitable. En proyectos mineros es fundamental planificar sus actividades con la finalidad de reducir efectos adversos en ambiente. Esta planificación conlleva aplicar instalaciones físicas que permitan aislar los desechos generados por la actividad minera con el objetivo de evitar que contaminen cuerpos de agua, suelo y aire, así como también reducir el riesgo a la salud humana. Estas instalaciones son conocidas como presas de jales, relaves o colas (Huang et al., 2018).

México tiene una amplia diversidad de conflictos mineros. Entre otras cosas, esta situación se atribuye a la falta de un marco legal que involucre los aspectos social y ambiental con el propósito de sancionar la falta de cumplimiento de políticas públicas orientadas al desarrollo sustentable (González, 2013). La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA) no obliga a las empresas a someterse a auditorias de carácter ambiental, lo que impide llevar a cabo un monitoreo ambiental gubernamental que sea sistematizado (Armendáriz, 2016). Consecuentemente, esto permite la perpetuidad de **pasivos ambientales mineros**<sup>1</sup>, escaso seguimiento y a que no se tomen medidas preventivas o correctivas oportunamente. De acuerdo con el Programa Sectorial de Medio Ambiente 2013-2018, del total de sitios contaminados a nivel nacional registrados en el Sistema de

---

<sup>1</sup> Suma de los daños ambientales y aquellos no compensados por parte de una empresa a lo largo de toda su actividad normal o en caso de accidente, se le considera como una deuda hacia la comunidad donde se opera  
RUSSI, D. & MARTÍNEZ-ALIER, J. 2003. Los pasivos ambientales. *Iconos: Revista de Ciencias Sociales*, 123-133.

Sitios Contaminados (SISCO), 13% provienen del manejo inadecuado de residuos peligrosos provenientes de actividades mineras.

Acorde con la normatividad mexicana, los jales son residuos provenientes de las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT, 2013). La contención de jales en presas es una de las estrategias más implementadas, sin embargo, su efectividad para bloquear Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) por periodos largos no es muy clara y es un tema que aún se encuentra en discusión, aunado al hecho de que las condiciones climáticas como la erosión causada por la lluvia y el viento pueden transportar partículas de este material a la vecindad (Pokhrel and Dubey, 2013). Este fenómeno de transporte tiene el potencial de causar problemas de salud a personas que inhalen o ingieran las partículas suspendidas provenientes de dichas instalaciones mineras. Se considera que aproximadamente del 97-99% del mineral procesado se convertirá en jales (Adiansyah et al., 2015).

Desde una perspectiva de legislación, los jales deben ser considerados como sedimentos, en vez de suelos y el definir si el material que contienen puede ser clasificado como residuos de tipo tóxicos requiere comparar las concentraciones de los metales analizados con los valores de referencia que están establecidos en la normatividad mexicana (Ramos-Arroyo and Siebe-Grabach, 2006).

Pachuca y otros municipios han crecido de forma acelerada, causando un elevado porcentaje de vivienda informal, construida tanto en ejidos como en zonas de riesgo. Esta situación se debe a la falta de una visión que promueva el desarrollo urbano sustentable, la calidad de vida y la inclusión social (SEDESOL, 2013). Este crecimiento, inicialmente no contemplado, causo que instalaciones mineras, entre ellas los jales mineros, fueran rodeadas progresivamente hasta ubicarse dentro del territorio urbano, situación que ha llegado a ser considerada como un riesgo a la salud humana. Debido a ello, las autoridades locales en conjunto con la sociedad necesitan llevar a cabo estrategias para minimizar el riesgo y orientar las operaciones mineras a un modelo más sustentable (Ngole-Jeme and Fantke, 2017, Xu et al., 2019).

A través de diversos estudios de caracterización se ha comprobado que los jales de la Comarca Minera aún presentan concentraciones de EPT (como Pb, Mn, Cd, Ni, entre otros).

Debido a la presión ejercida por la densidad poblacional, los terrenos que albergan los jales mineros se han convertido en objeto de interés para el desarrollo urbano. Entre las propuestas que se han elaborado para mitigar la problemática, destaca la reubicación de los jales al municipio de Epazoyucan, situación que ha generado respuestas negativas por parte de los pobladores (EJA, 2020).

Esta situación requiere poner sobre la balanza si a largo plazo será más favorable mantener la situación actual aplicando medidas de mitigación o llevar a cabo medidas de corrección y así responder la incógnita ¿Qué tan sustentable es la Comarca Minera en torno al manejo de los jales? El objetivo de este trabajo consiste en realizar una evaluación del grado de sustentabilidad del manejo de residuos mineros en el estado actual en contraste con sus antecedentes y la implementación de un marco de Indicadores de Sustentabilidad que pueda brindar un diagnóstico inicial. Esto permitirá evaluar cómo ha sido la interacción del desarrollo urbano en torno a la presencia de los jales mineros, con la finalidad de proponer medidas correctivas útiles para las políticas públicas.

La presente tesis está estructurada de la siguiente manera: Capítulo I, presenta los aspectos teóricos bajo los que se sustenta la problemática; Capítulo II, describe los antecedentes del área de estudio; Capítulo III, describe los objetivos de la presente investigación; Capítulo IV, contiene la metodología implementada para el cumplimiento de los objetivos; Capítulo V, muestra los resultados obtenidos y su discusión; Capítulo VI, presenta las conclusiones de la presente investigación; Bibliografía, muestra las referencias usadas en todo el documento; y Anexos, contiene material adicional.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1.GESTIÓN AMBIENTAL**

La gestión es un proceso que abarca determinadas funciones y actividades organizativas con la finalidad de lograr objetivos y metas deseadas, estos procesos de planificación tienen la finalidad de determinar los resultados que pretende alcanzar una organización (Muriel, 2006). Dirigir los procesos de gestión hacia el medio ambiente conlleva la reducción y/o eliminación de los impactos ambientales negativos, irreversibles y permanentes de las actividades humanas (Gómez, 2002).

Se conoce como gestión ambiental al conjunto de acciones encaminadas a lograr la racionalidad en el proceso de decisión relativo a la conservación, defensa, protección y mejora del medio ambiente, tomando como base una coordinada información multidisciplinar y la participación ciudadana (Conesa, 1997). Su implementación requiere una serie de instrumentos jurídicos, administrativos y económicos y es un campo de investigación basado en las ciencias naturales y sociales (Conesa, 1997, Bryant and Wilson, 1998).

La gestión ambiental es algo que las agencias gubernamentales realizan en nombre de los ciudadanos; desde este punto de vista, el estado es el actor clave que gestiona todos los bienes públicos (Bryant and Wilson, 1998). Sin embargo, la cooperación entre gobiernos, administraciones públicas y actores no gubernamentales es necesaria para la elaboración de políticas públicas. Estas políticas abarcan el aspecto ambiental y amplían la función del Estado al abordar temas de interés para la sociedad civil y la iniciativa privada, surgiendo así la gobernanza ambiental, que es la herramienta que permite articular la legitimidad en la toma de decisiones (Lezama and Domínguez, 2006).

Habitualmente la implementación de un sistema de gestión ambiental en una empresa está motivada por incentivos económicos y mercadeo; como la certificación ISO 14001, cuya aplicación puede impulsar la minimización, aprovechamiento o valorización de los residuos como un producto con “valor ambiental” (Vera and Cañon, 2018). Generalmente el interés de la gestión ambiental es implementado para tener competitividad en el mercado y la

creciente tendencia de exigir la certificación ISO 14001; la certificación por sí misma muestra que se implementan prácticas ambientales en una empresa (Nawrocka and Parker, 2009).

La interpretación del desempeño ambiental, logrado con la ISO 14001, puede tener múltiples interpretaciones según la función que cumple la organización que la implementa y la percepción del sistema de gestión ambiental, tanto de la organización como del público en general (Nawrocka and Parker, 2009). Legislaciones nacionales e internacionales que respetan la protección al medio ambiente se basan en datos que caracterizan los fenómenos ambientales (Wuana and Okieimen, 2011).

La aplicación de marcos legales para la regulación de actividades contaminantes es compleja. Esto se debe a los desafíos que enfrenta: arbitrar entre las exigencias de corto plazo impuestas por el ámbito económico y las de largo plazo asociadas al equilibrio ecológico. Por otro lado, debe incentivar beneficios a un grupo difuso (sociedad) a través de la imposición de costos a un grupo específico (contaminadores). Estos beneficios consisten en la elaboración y aplicación de reglas, pero también de medidas que permitan su aplicación (Ugalde, 2010).

## **1.2.DESARROLLO SUSTENTABLE**

De acuerdo con Jochum (2015), el concepto de la sostenibilidad se inicio en Alemania del siglo XVII, inicialmente con el propósito de llevar a cabo la gestión de bosques. Fue hasta el periodo de 1945 a 1955 que el discurso del desarrollo comenzó a tomar forma debido al contexto internacional que había en curso (**Tabla 1**). Fue así, que países tercermundistas comenzaron a tener mayor relevancia debido a su relación con los países primermundistas, lo cual llevo a teorizar que se comprometía la prosperidad del primer mundo si continuaban las condiciones de pobreza y malestar social en el tercer mundo (Gómez, 2014). A finales de los 60's, la crisis ambiental alcanzo una nueva importancia debido a informes científicos que alertaban sobre el agotamiento de los recursos naturales y su progresivo deterioro. En los 70's, el modelo económico basado en la producción, consumo, explotación ilimitada y beneficio como único criterio a considerar generó que el medio ambiente tomara una prioridad política y generó la redacción de documentos, que manifestaban la importancia del ambiente (**Tabla 2**) y motivo la celebración de conferencias internacionales por parte de la ONU (Gómez, 2014, La Cruz and Salomón, 2019).

**Tabla 1. Los principales factores que dieron forma al discurso del desarrollo**

<b>Principales factores</b>	<b>Contextualización</b>
Luchas por la independencia en Asia y África y nacionalismo latinoamericano	Demanda de una reorganización del poder mundial, los sistemas de colonización del Primer Mundo al Tercer Mundo eran insostenibles
Visualización del Tercer Mundo como un área estratégica, la necesidad de nuevos mercados	La economía norteamericana buscaba expandir sus mercados a nivel mundial, para lo cual necesitaba acceder a materias primas de bajo costo para poder cubrir la capacidad de sus industrias. Dichas materias se encontraban en los países subdesarrollados.
La Guerra fría	El Tercer Mundo se convirtió en la arena de confrontación más importante, asistiendo el surgimiento de un nuevo orden y reconfiguración del poder.
El temor al comunismo	Se tenía la creencia que los países pobres eventualmente sucumbirían al comunismo, por lo que era indispensable rescatarlos de la su pobreza.
La superpoblación	Se contemplaba una reducción en las tasas de crecimiento a medida que los países se desarrollaran, sin embargo, los países pobres no podían esperar a que esto ocurriera.
La fe en la ciencia y la tecnología	En el siglo XIX se consideraba que el desarrollo de un país dependía más de la asistencia técnica que del capital

Fuente: Gómez (2014), p.118.

**Tabla 2. Principales sucesos en relación a lo ambiental**

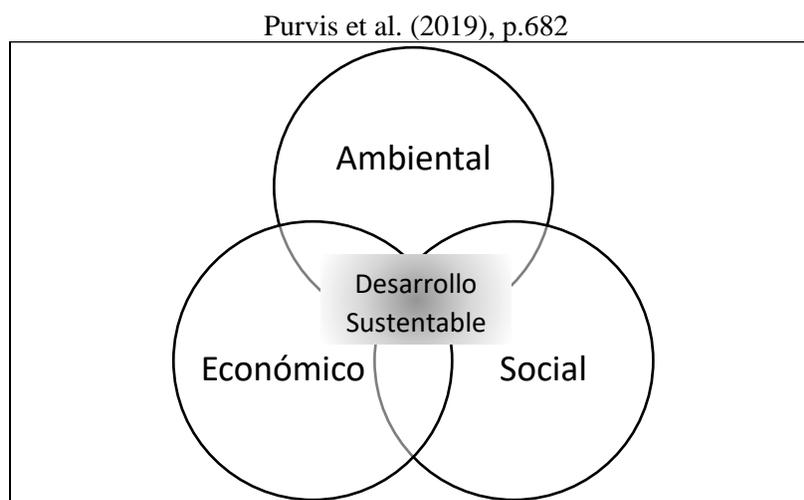
<b>Cronología de los principales sucesos y conferencias internacionales relacionados con la conciencia ecológica de la población</b>	
1948	Creación de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
1955	Simposio sobre “El papel del hombre en el cambio de la faz de la Tierra”, Princeton (EU).
1960-1970	Publicación de libros de impacto: R. Carson. Primavera silenciosa (1963), K. Boulding, La economía de la próxima nave espacial Tierra (1966), O. Ehrlich, La bomba demográfica (1968).
1971	Publicación de I Informe Meadows, Los límites del crecimiento, Club de Roma Creación del Programa el hombre y la biosfera de la UNESCO.
1972	Conferencia de Naciones Unidas sobre El Medio Humano, Estocolmo. Creación de PNUMA.
1973	Primera “crisis energética”.
1976	Primera Conferencia de Naciones Unidas sobre Asentamientos Humanos (Hábitat I), Vancouver.
1979	Segunda “Crisis Energética”.
1970-1980	Publicación de libros de impacto: H.T. Odum, Environment, Power and Society (1971), B. Commoner, The Closing Circle (1972), E.F. Schumacher, Pequeño es hermoso (1973), H.T. y E.C. Odum, Energy Basis for Man and Nature (1976), A. Lovins, Soft Energy Paths (1977), B. Commoner, La pobreza del poder (1979), G.E. Barney (dir.) (1981). The Global 2000. Report to the president.
1980-2003	Abaratamiento del petróleo y materias primas en general. Decaen las publicaciones sobre el manejo de la energía y los materiales en la civilización industrial y aumenta la literatura sobre instrumentos económicos para la gestión de residuos y valoración de externalidades a fin de incluir los temas ambientales en el razonamiento económico estándar.
1987	Publicación del Informe Brundtland.
1989	Final de la “guerra fría”. Publicación del II Informe Meadows, Más allá de los límites del crecimiento.
1992	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente, Río de Janeiro. Tratado de Maastricht y V Programa de Acción sobre Medio Ambiente de la Unión Europea (UE).
1993	Publicación del Libro Blanco sobre crecimiento, productividad y empleo, de la UE Creación del Proyecto Ciudades Europeas Sostenibles.
1994	Aparecen las Agendas de Desarrollo Local.
1995	Publicación del Libro Verde sobre el medio ambiente urbano de la Comisión Europea.
1996	Segunda Conferencia de Naciones Unidas sobre Asentamientos Humanos (Hábitat II), Estambul.
1998	Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Kioto.
2002	Conferencia de Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo.

Fuente: Gómez (2014), p.124.

Posteriormente en los 80's, se establecieron movimientos ecologistas que cuestionaban a manera de protesta pública el progreso en sí; esta situación llamo la atención de los tomadores de decisiones, estableciendo el debate de continuar con el modelo tradicional o apoyar un concepto de crecimiento común, buscando una **utopía**<sup>2</sup> clasica-moderna y con aires capitalistas de progreso (Jochum, 2015).

Después de la conceptualización del desarrollo sustentable en el Informe Brundtland (1987), la conservación ecológica paso de ser un obstáculo del crecimiento económico a ser un instrumento para asegurarlo (Gómez, 2014). Definiéndolo como la capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las necesidades y oportunidades de las generaciones futuras.

En una visión clásica, el desarrollo sustentable es definido en tres aspectos interdependientes: económico, social y ambiental (**Ilustración 1**), mismos que son representados en niveles nacional, regional y local.



*Ilustración 1. Representación típica de la sustentabilidad*

**Aspecto económico;** el estudio de la Economía ha reconocido la importancia misma de los recursos naturales en el funcionamiento de un sistema. Adam Smith, describió la existencia de una “mano invisible” cuya función es mantener un “orden natural” en todo sistema

---

<sup>2</sup> Utopía es la obra literaria socialista escrita por Tomas Moro en 1516. La RAE la define como un proyecto deseable, pero de muy difícil o imposible realización.

económico (Vergara and Ortiz, 2016), similar a lo que se conoce como **equilibrio ecológico**<sup>3</sup>. Gestionar adecuadamente la actividad económica, permite cierta tolerabilidad sobre los impactos ambientales que ocasiona, a mayor desarrollo empresarial, mayor el impacto hacia el medio ambiente (Reynaldo and Reynaldo, 2013). De acuerdo con **Marx**<sup>4</sup>, la mercantilización de bienes y servicios es una construcción social y económica; la naturaleza no produce mercancías, es la fuerza laboral quien lleva a cabo su metamorfosis y permite visualizar que la principal consecuencia del desarrollo económico es la destrucción de las condiciones naturales de producción (Vergara and Ortiz, 2016). **Malthus**<sup>5</sup>, relaciono el crecimiento geométrico de la población a problemas de disponibilidad de los recursos, ante esta situación en donde conceptualizamos un mundo con recursos finitos, significa una reducción gradual de la repartición per cápita; un mundo finito sostiene una población finita, al fallar este sistema se produce una “tragedia” (Hardin, 1968, Vergara and Ortiz, 2016).

**Aspecto social;** es considerado como la dimensión que más requiere desarrollarse y a la vez la más difícil de reglamentar (Polo, 2006). La sustentabilidad se orienta a la mejora de la calidad de vida por medio de la reasignación de recursos económicos, esto conlleva garantizar el consumo de los más vulnerables (Larrouyet, 2015).

**Aspecto ambiental;** el medio ambiente puede interpretarse como la interrelación de elementos bióticos y abióticos, socioeconómicos, culturales y estéticos con que interactúa el hombre (Reynaldo and Reynaldo, 2013). El aspecto ambiental es considerado el más débil del desarrollo sustentable, debido a que la protección ambiental carece de la misma significación moral que se le atribuye a una vida humana y además de que es considerado un bien público, algo que los seres humanos pueden disfrutar libremente, que no cuenta con un propietario e incluso no tiene costo económico alguno (PNUMA, 2011).

### **1.2.1.DESARROLLO URBANO SUSTENTABLE**

Las sociedades más avanzadas son el ejemplo por seguir de las sociedades en vías de desarrollo que buscan eliminar sus desequilibrios presentes, en este proceso las ciudades

---

<sup>3</sup> “La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos” SEMARNAT 2015. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental. México: SEMARNAT.

<sup>4</sup> Karl Marx (1818-1893), economista, autor de la Teoría del valor.

<sup>5</sup> Robert Thomas Malthus (1798-1804), clérigo británico, autor de la Teoría de la población de Malthus.

modifican profundamente el medio ambiente, en muchos casos de forma irreversible (Castro, 2002, Gómez, 2014). Las zonas urbanas continuamente requieren nuevos terrenos para uso agrario, recursos humanos (burocracia) e infraestructura (acueductos y viaductos) que posibilitan la llegada de recursos a la ciudad (Castro, 2002).

El desarrollo urbano sustentable puede interpretarse como una herramienta para la resolución de problemas específicos en la planeación urbana, como puede ser la regeneración o recuperación de espacios públicos que han sido abandonados (Lezama and Domínguez, 2006).

Las zonas urbanas y otros ambientes intervenidos por el hombre se conforman en base a un conjunto de eventos y partes que determinan relaciones internas y externas, definiendo lo que se conoce como sistema; todo sistema incurre en un gasto energético debido al intercambio de materia y energía, mismos que pierden su capacidad de recuperar su magnitud y forma inicial, este desorden conocido como entropía genera un cambio irreversible que pudiera no ser acorde a las condiciones de equilibrio del sistema (Díaz Álvarez, 2014).

La visualización del territorio urbano como un ecosistema se basa en comprender la estructura de una ciudad y su funcionamiento a través de procesos que involucran flujos de materia y energía. Los sistemas urbanos se basan en intercambios de materia y energía de forma interna y externa, conceptualizándose como los flujos entre los sectores económicos, cuya productividad genera tanto residuos como productos útiles (Díaz Álvarez, 2014). Es así como desde la perspectiva de la Ecología Urbana, se analizan las interrelaciones del nexo sociedad-ambiente dentro de un territorio delimitado por el desarrollo urbano (Di Pace, 2001).

Cuando la interacción de los elementos de un “ecosistema urbano” generan consecuencias sobre la calidad de vida de la población presente o futura es cuando se presentan los conflictos en torno a temas ambientales (Di Pace, 2001). La presencia de acciones sustentables en territorios urbanos tiene el potencial de mejorar la calidad de vida en asentamientos urbanos. Sin embargo, un crecimiento mal planificado trae consecuencias que perjudican el alcance de metas y objetivos (Domínguez, 2016).

El urbanismo tradicional se enfoca en el uso eficiente del suelo, dado que se le considera un bien económico de alto valor y escaso. No considerar el aspecto ecológico en el funcionamiento interno de la ciudad genera una ineficiente planificación urbana (**Tabla 3**) (Castro, 2002).

*Tabla 3. Ecosistema urbano vs. Ecosistema natural*

<b>Características</b>	<b>Urbanismo del ecosistema urbano</b>	<b>Urbanismo del ecosistema natural</b>
Estructura	Espacio interno urbano muy estructurado. Baja entropía.	Espacio interno natural menos estructurado. Mayor entropía ante la interacción con los sistemas urbanos.
Espacio para la diversidad	Se favorece la diversidad social, pero se convierte en un auténtico “desierto cultural” que anula el desarrollo de otras especies distintas a la humana.	Biodiversidad elevada.
Distribución de usos en el espacio	Tradicional segregación. Predominio de espacios de acceso privado.	Integración. Predominio de espacios de libre acceso: competición por el espacio entre especies.
Crecimiento	No existen los frenos naturales al desarrollo de las poblaciones. Límites reales básicamente por el coste económico de las infraestructuras urbanas. Potencialmente ilimitado gracias al transporte de materiales, energía y residuos.	Limitado en el espacio por las condiciones abióticas (físicas) y bióticas (poblaciones existentes) del medio natural.
Viviendas	Los espacios residenciales artificiales, no integrados ecológicamente, muy acotados y dependientes de materias y energía del exterior.	El espacio “residencial” está integrado con otros usos y no depende de energía más que la solar (bioclimático).
Infraestructuras de transporte	Desarrollo de infraestructuras de transporte ante la necesidad creciente de transporte horizontal largo para comunicar usos urbanos.	Dada la integración de usos, no se establecen espacios físicos únicamente para el transporte. Predominancia del transporte vertical y corto sobre el horizontal y largo.
Energía que entra en el sistema físico	Energía exosomática (combustibles fósiles).	Energía endosomática (Sol).
Intensidad energética por superficie	Muy elevada.	Menor en términos relativos.
Infraestructuras de residuos y reciclaje	Necesidad de establecer infraestructuras específicas para el transporte horizontal de los residuos y su reciclaje parcial.	Reciclaje vertical (transporte corto) y completo (organismos detritívoros).

Fuente: Castro (2002), p.47.

Los territorios urbanos inicialmente son considerados como la representación más eficaz de la modernidad donde los principios de la igualdad, la razón, la democracia, etc. Se expresan de la mejor manera, lo cual deriva del exceso de racionalidad y artificialidad que estos territorios encarnan. Sin embargo, también expresan sus principales males, como la negación, subordinación y sometimiento de la naturaleza sobre la que se erige y nutre, en aras de la modernidad y el consumo que demanda el estilo de vida (Lezama and Domínguez, 2006).

### **1.2.1.1. ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO**

La ciudad es el principal foco difusor del desarrollo humano (Castro, 2002). De acuerdo con el PNUD (2014), se entiende por desarrollo humano a la libertad con la que cuentan las personas para gozar de una vida larga, saludable, alcanzar los objetivos que ellas mismas consideren valorables y participar en el desarrollo sustentable. Como se menciona en la definición se toman en cuenta tres dimensiones: 1) el gozo de una vida saludable y larga; 2) capacidad de adquirir conocimientos; 3) la oportunidad de contar con recursos que hagan factible el nivel de vida digno. Calcular el índice de desarrollo humano permite evaluar el desempeño de un país, estado o municipio.

Los obstáculos en el desarrollo humano pueden considerarse como indicadores de desigualdad social, ya que obstaculizan el acceso a beneficios sociales como la educación, salud, empleo, crédito e incluso recursos naturales. La desigualdad además de ser mala es peligrosa, alimenta el extremismo y sabotea el desarrollo sustentable (PNUD, 2018). Ningún país ha logrado el desarrollo sin urbanización sustentable (Tripathi, 2019).

### **1.2.2. AGENDA 2030**

A raíz de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Cumbre de Río o de la Tierra) en 1992 y con ello la publicación de la Agenda 21, se propuso una serie de indicadores donde diversos países participaron en el diseño de un marco de indicadores de sustentabilidad. Posteriormente en 2015 se firmó la Agenda 2030 en Estados Unidos (EU), y con ello el establecimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) y sus 169 metas y el compromiso de todo el mundo para mejorar el bienestar de la población global. Dicha agenda tomo como base los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la Agenda 21 y busca completar para el 2030 lo que no se logró.

El desarrollo sustentable es considerado como la principal herramienta para afrontar los inmensos desafíos contemporáneos: miles de millones de personas viviendo en pobreza extrema; aumento de desigualdades; oportunidades, riqueza, poder, géneros; aumento de frecuencia e intensidad de desastres naturales; incremento de conflictos; agotamiento de recursos naturales, degradación ambiental y cambio climático (ONU, 2015).

Si bien cada país afronta sus propios desafíos, los más vulnerables y menos adelantados merecen especial atención ya que son los que atraviesan graves dificultades. Los ODS tienen un alcance mundial, aplicación universal y respetan las políticas y prioridades nacionales. Sin embargo, a pesar de que los ODS expresan las mejores aspiraciones a nivel mundial, cada país fijara sus propias metas y la forma en que adoptara esas aspiraciones y metas mundiales. Por ello es necesario empoderar a las personas más vulnerables (ONU, 2015).

La presente investigación abarca los objetivos 3, 11, 15, 16 y 17 (**Tabla 4**).

*Tabla 4. Objetivos del Desarrollo Sustentable*

Objetivo	Metas	Contexto
 <p>Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades.</p>	<p>Para 2030 reducir el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo. Reforzar la capacidad de todos los países, en materia de alerta temprana, reducción de riesgos y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial.</p>	<p>La presencia de residuos mineros en una zona urbana supone un riesgo a la salud humana.</p>
 <p>Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.</p>	<p>Para 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales. Aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos. Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo. Aumentar el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres.</p>	<p>Sobre los jales se ha desarrollado infraestructura urbana y aquellos que no han sido urbanizados se han clasificado como terrenos con una alta plusvalía.</p>
 <p>Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.</p>	<p>Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan. Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales.</p>	<p>Los jales mineros degradan el ecosistema y se incorporan a la flora y la fauna. Entre las propuestas de manejo sustentable de jales está la revegetación.</p>



Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos los niveles institucionales eficaces e inclusivas que rindan cuentas.

Reducir todas las formas de violencia y las correspondientes tasas de mortalidad en todo el mundo.

Promover el estado de derecho en los planos nacional e internacional y garantizar la igualdad de acceso a la justicia para todo

Crear a todos los niveles instituciones eficaces y transparentes que rindan cuentas

Garantizar el acceso público a la información y proteger las libertades fundamentales, de conformidad con las leyes nacionales y los acuerdos internacionales.

La propuesta de reubicación de los jales ha generado conflictos en baja escala.



Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible.

Adoptar y aplicar sistemas de promoción de las inversiones en favor de los países menos adelantados

Promover el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales y su transferencia, divulgación y difusión a los países en desarrollo en condiciones favorables, incluso en condiciones concesionarias y preferenciales, según lo convenido de mutuo acuerdo.

Mejorar la coherencia de las políticas para el desarrollo sostenible.

Mejorar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible, complementada por alianzas entre múltiples interesados que movilicen e intercambien conocimientos, especialización, tecnología y recursos financieros.

Fomentar y promover la constitución de alianzas eficaces en las esferas pública, público-privada y de la sociedad civil, aprovechando la experiencia y las estrategias de obtención de recursos de las alianzas

De aquí a 2030, aprovechar las iniciativas existentes para elaborar indicadores que permitan medir los progresos en materia de desarrollo sostenible y complementen el producto interno bruto, y apoyar la creación de capacidad estadística en los países en desarrollo.

Debido a los altos volúmenes de jales que genera la minería su manejo sustentable es un tema de interés global.

Fuente: ONU (2015).

### 1.3.INDICADORES AMBIENTALES

No existe una definición única de lo que es un indicador ambiental, la Environmental Protection Agency (EPA) los considera como una forma de medir las presiones que afectan los componentes del ambiente pudiendo ser tan complejas como la interacción de las dimensiones espacial y temporal. Otra definición más aceptada y propuesta por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), lo define como una

fuentes de información que describen el estado de un fenómeno en el ambiente (Rodríguez-Ortega and Flores-Martínez, 2008).

Su función es indicar algo con indicios o señales sobre el aspecto del ambiente. Permite la comunicación y el sustento de información científica y técnica, así como la participación de los tomadores de decisión y la sociedad en las problemáticas ambientales. Son fundamentales para el desarrollo de políticas ambientales debido a que dan a conocer la situación actual. Sin embargo, para garantizar el cumplimiento de su función, estos deben cumplir ciertos requisitos (**Tabla 5**), cabe resaltar que uno de sus inconvenientes es su falta de conexión con sistemas que permitan su actualización rápida (Vallejo and Guardado, 2000, Rodríguez-Ortega and Flores-Martínez, 2008).

*Tabla 5. Criterios para seleccionar indicadores ambientales según la OCDE*

Relevancia para los tomadores de decisiones y público en general	<p><b>Los indicadores deben:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporcionar una visión de las condiciones ambientales, presiones ambientales y respuestas de la sociedad o gobierno.</li> <li>• Ser sencillos, fáciles de interpretar y capaces de mostrar las tendencias a través del tiempo.</li> <li>• Responder a cambios en el ambiente y en las actividades humanas relacionadas.</li> <li>• Proporcionar una base para las comparaciones internacionales.</li> <li>• Ser aplicables a escala nacional o regional, según sea el caso.</li> <li>• Tener preferentemente un valor con el cual puedan ser comparados.</li> </ul>
Solidez analítica	<p><b>Los indicadores deben:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estar teórica y científicamente bien fundamentados.</li> <li>• Estar basados en consensos internacionales.</li> <li>• Ser capaces de relacionarse con modelos económicos y/o de desarrollo, así como con sistemas de información.</li> </ul>
Medición	<p><b>Los datos necesarios para construir los indicadores se caracterizan por:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estar disponibles con una razonable relación costo/beneficio.</li> <li>• Estar bien documentados y gozar de validez reconocida.</li> <li>• Ser actualizados a intervalos regulares con procedimientos confiables.</li> </ul>

• Fuente: Rodríguez-Ortega and Flores-Martínez (2008), p.18.

Los indicadores ambientales cuentan con diversas clasificaciones; según el Instituto Nacional de Ecología y la entonces Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) (1994-2000) los clasifican en dos grupos; a) aquellos que representan acciones directas sobre el ambiente a causa de la actividad humana (volumen de residuos, emisión de contaminantes, etc.), y b) los que representan condiciones de las actividades que genera la problemática, consiste en predecir la evolución de la problemática, permitiendo definir las acciones y políticas a implementar en los sectores causantes de la problemática

(Armendáriz, 2016). Si son agrupados en base al conjunto que comparten entre sí, es posible clasificarlos como se observa en la **Tabla 6**.

*Tabla 6. Conjunto de indicadores ambientales*

<b>Conjuntos de indicadores ambientales</b>	
Indicadores básicos de desempeño ambiental	Compuesto por cerca de 140 indicadores orientados fundamentalmente a la evaluación del desempeño ambiental del país. Se distribuyen en temas de atmósfera, agua, suelos, residuos sólidos municipales, residuos peligrosos, biodiversidad, recursos forestales y pesqueros. Este conjunto es idóneo para el público especializado.
Indicadores clave	Su principal propósito es la comunicación de información ambiental. Lo integran un total de 15 indicadores. Está dirigido a tomadores de decisiones y no especialistas para quienes en muchos casos no es posible la revisión y análisis del conjunto básico.
Indicadores internacionales	Son los promovidos por organizaciones internacionales o acuerdos bilaterales con otros países. Ubican al país en el contexto internacional.
Indicadores ambientales estatales	Se orientan al análisis del desempeño ambiental en un marco estatal, por lo que solo establece las necesidades propias de cada estado. <b>En México se cuenta únicamente con el sistema de indicadores ambientales del estado de Hidalgo.</b>
Indicadores regionales	Abarca indicadores destinados a regiones particulares del país que requieren evaluación y monitoreo específico, sirven para evaluar el funcionamiento de instrumentos de planeación.

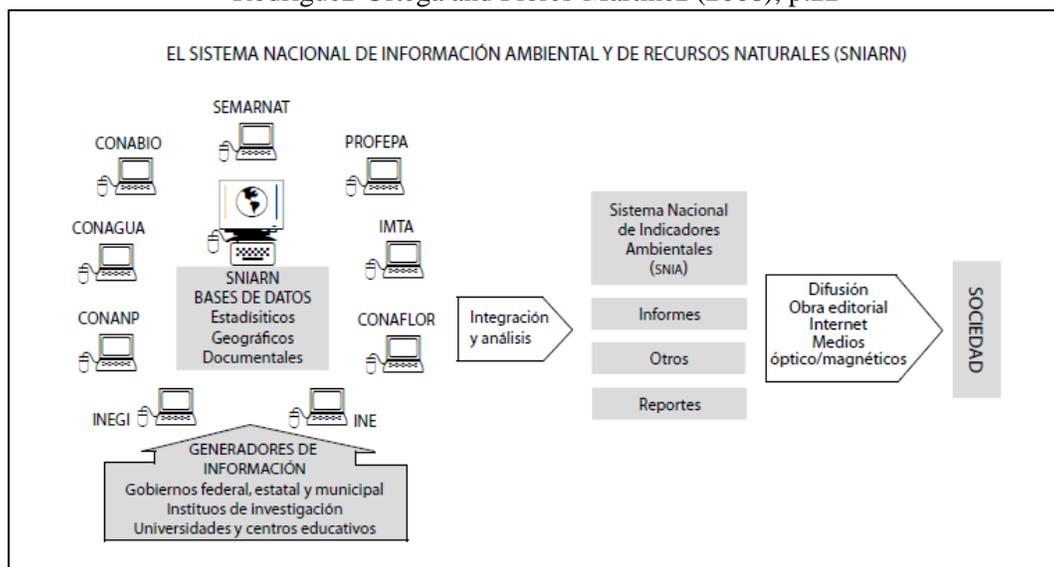
Fuente: Rodríguez-Ortega and Flores-Martínez (2008)

En México, los indicadores ambientales se insertan dentro del Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA), un sistema cuya función es recopilar, organizar y difundir información sobre los recursos naturales a nivel nacional con apoyo de órganos de gobierno federal, estatal y municipal, así como universidades y centros de investigación forma parte del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), mismo que está a cargo de la Dirección General de Estadística e Información Ambiental (DGEIA) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (**Ilustración 2**).

Los indicadores ambientales permiten el seguimiento de los impactos ambientales tanto del ámbito biofísico como del socioeconómico, permitiéndoles evaluar la efectividad de los programas gubernamentales implementados (López and Rodríguez, 2008). Sin embargo, las interrogativas: ¿cómo debe ser la selección de los componentes e indicadores?, ¿cuántos y cuáles componentes e indicadores debe incluir en el índice para hacer una medición efectiva?, ¿los indicadores pueden considerarse como una buena aproximación a la medición del fenómeno a evaluar?, serán siempre una constante. El criterio de selección es determinante para el diseño de un sistema de indicadores, ya que se quiere de información cuantitativa de múltiples componentes e indicadores que lo explican. Aplicar un criterio de selección en un sistema de indicadores debe cumplir dos funciones; 1) actuar como filtro, ya que permitirá resumir una gran cantidad de datos en un número reducido, siendo el primer filtro definir los

componentes, temas o áreas de interés en el enfoque del sistema, ya sea el desarrollo sustentable o la ciudad como un ecosistema urbano y 2) proporcionar al sistema una mayor calidad estadística en la información, es decir, que sean medibles de acuerdo a su estado o categoría (Escobar, 2006).

Rodríguez-Ortega and Flores-Martínez (2008), p.22



*Ilustración 2. El Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) y su relación con el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales*

#### 1.4.INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD

Evaluar el cumplimiento del desarrollo sustentable requiere la construcción de un conjunto de indicadores teniendo como base la capacidad de informar que tan protegido está el medio ambiente. Más allá de responder a necesidades políticas, los indicadores requieren un alto nivel de representatividad dentro del sistema objetivo (López, 2008).

En muchos sistemas de indicadores de desarrollo sustentable, la problemática ambiental de los asentamientos urbanos ha sido tratada como un componente temático, debido a la restricción de datos para desarrollar sistemas confiables de indicadores, la generación de esta información aún puede considerarse como un tema reciente (Escobar, 2006).

A nivel mundial se han realizado varias iniciativas de modelos de indicadores a entornos urbanos, como el Sistema de Indicadores Urbanos, propuesto en la Conferencia sobre Asentamientos Humanos en Nairobi, cuyo propósito es el establecimiento a escala mundial de una Red de Observatorios Urbanos, permitiendo así la evaluación y control de la

implementación de los Programas Hábitat y Agenda 21. Otro ejemplo, son las trece áreas de indicadores propuesta por la OECD, en donde el fenómeno ambiental urbano es un área de interés especial. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un conjunto de indicadores de “ciudades saludables” en el Programa Salud para todos en 2000 (Escobar, 2006).

Los sistemas de indicadores permiten detectar lagunas de conocimiento, orienta los recursos disponibles y evalúa capacidades y potencialidades en diversos escenarios. Su establecimiento no es el fin del proceso, es un proceso circular que genera nuevos indicadores (Guerrero, 2005).

### **1.5.¿MINERÍA SUSTENTABLE?**

Es sencillo determinar cuándo una actividad no es sustentable, tomando en cuenta los impactos ambientales negativos que genera y por otro lado, es difícil precisar cuándo se ha alcanzado la sustentabilidad (Montero, 2002).

Se considera que el mayor desafío de aplicar el desarrollo sustentable en el sector minero es la dificultad para vincular dicho concepto con el éxito financiero, si una empresa minera (o de cualquier giro) no es capaz de sobrevivir o prepararse, no puede aportar al desarrollo sustentable (MMSD, 2002). Los costos ambientales y sociales ya sean inmediatos o a largo plazo deben sopesarse junto a las ganancias, ya que todo beneficio conlleva un costo; para el caso del sector minero, los beneficios sociales y económicos son a expensas de la calidad ambiental, situación que de continuar sin un plan de desarrollo corre el riesgo de causar un desequilibrio en los tres ámbitos de la sustentabilidad (Polo, 2006).

El aprovechamiento de metales preciosos ha servido para impulsar el desarrollo y la prosperidad industrial a lo largo de la historia, por ello se cree que el sector minero tiene el potencial para desempeñar un papel importante en el desarrollo sustentable (Pokhrel and Dubey, 2013). Sin embargo, esto solo sería posible si la explotación de recursos minerales implementara una gestión eficaz que sea respaldada por métodos formales y consistentes de toma de decisiones, integrando objetivos de carácter ambiental y social (Reynaldo and Reynaldo, 2013, Pimentel et al., 2015).

Con la finalidad de mejorar la percepción negativa de la sociedad (así como de potenciales clientes y accionistas) en torno a la minería, habitualmente dichas empresas optan por alcanzar la Responsabilidad Social Empresarial, cuyo objetivo es compartir parte de las ganancias de la empresa con la sociedad (Armendáriz, 2016). En estos casos las empresas mineras mejor consolidadas integran la gestión ambiental como un componente de la sustentabilidad en la minería, en el caso de las pequeñas empresas mineras, la generación de valor agregado en los productos finales, mientras que, para las grandes empresas, la motivación es el compromiso asumido a nivel internacional (Carmona-García et al., 2017).

La industria minera tiende a operar en áreas sin legitimidad social para posteriormente abandonarlas cuando los recursos económicos valiosos se han agotado, dejando un legado de impactos sociales y ambientales negativos (Jenkins, 2004). Por ello, la minería es y será siempre una actividad destructiva con altos costos ambientales. El principal objetivo de la sustentabilidad aplicada a la minería sólo podría ser el optimizar la extracción de metales, lo que se traduce en el incremento de beneficios financieros combinados con la minimización de impactos ambientales y la reducción de costos de remediación (Dold, 2008).

## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES**

### **2.1. MINERÍA INTERNACIONAL – CASO DE SUDÁFRICA**

A lo largo de la historia, la extracción de minerales y metales ha sido la columna vertebral de la urbanización y la prosperidad industrial, toda actividad emplea metales de una forma u otra. Los metales pueden ser de dos tipos: básicos y preciosos, donde los básicos se consideran como aquellos no ferrosos y de bajo costo como el Cu, Pb, Ni y Zn entre otros, usualmente son reactivos y forman óxidos. Los metales preciosos en cambio son menos reactivos, escasos y muy costosos, como Au y Ag (Pokhrel and Dubey, 2013).

Anteriormente, era común la presencia de asentamientos humanos y sus actividades cerca de minas (Carvalho, 2017). Los pueblos mineros de Sudáfrica, por ejemplo, crecieron y se desarrollaron alrededor de instalaciones mineras, permitiendo la construcción de una economía vibrante y convirtió al país en uno de los más industrializados del continente (Davies and Mundalamo, 2010, Sorensen, 2012, Belle et al., 2021). Sin embargo, varias de sus comunidades, originalmente rurales, presentan altas tasas de analfabetismo y son dependientes de la minería para su desarrollo, lo cual los pone en riesgo de una muerte silenciosa el día que cierren las minas (Cronjé and Chenga, 2009).

La minería es una actividad riesgosa para la salud y el medio ambiente, aunque siempre se reconoce su importancia económica, por ello su participación en el desarrollo sustentable se considera un tema crucial. Incluso antes de la adopción de la sustentabilidad en la industria minera, las empresas aportaban cantidades sustanciales de ingresos económicos a pueblos mineros por encima de lo que exigen los regímenes de impuestos corporativos, con la finalidad de crear un estilo de vida atractivo para el trabajador minero y sus familias. Por ello, regiones como Sudáfrica han sido particularmente “casos exitosos”, ya que podían afirmar una contribución al desarrollo socioeconómico durante periodos largos de tiempo, tal es el caso de la explotación de oro en Witwatersrand, que ha perdurado por más de un siglo y ha sido responsable del establecimiento de la ciudad de Johannesburgo. Este desarrollo también favoreció a países vecinos como Lesotho, Mozambique y Botswana, ya que siempre se mantuvo el interés por mantener las ciudades con cierto nivel de desarrollo para retener al personal. Esto se ha traducido en sustentabilidad en los informes mineros de Sudáfrica (Sorensen, 2012).

Inevitablemente, el entorno natural sufrió alteraciones: la amplia sabana sudafricana fue cambiada por suburbios y un bosque artificial; los vertederos de minas están desapareciendo a medida que son reprocesados para extraer vestigios de minerales y se depositan en zonas apartadas, lo cual supone alteraciones para la esorrentía natural del agua y la generación de drenaje ácido siendo un riesgo para la biodiversidad acuática y los suelos agrícolas (Sorensen, 2012, Iyaloo et al., 2020).

En 1994, se llevó a cabo una transición que introdujo la Ley de Desarrollo de Recursos Minerales y Petroleros de Sudáfrica con la finalidad de regular el sector minero y permitir que el gobierno administre el derecho de explotación de minerales. Sin embargo, documentos gubernamentales derivados de esta ley sufrieron sesgos a favor de la cooperación del gobierno con la industria. La industria debía otorgar mano de obra costosa y planes para licencias mineras y a su vez, ceder el 26% de su capital social a la población sudafricana más vulnerable (Sorensen, 2012).

Después del 94, la minería sudafricana comenzó a maximizar las ganancias de los accionistas, imitando así las tendencias mundiales y como una forma de reducir los costos por parte de la oferta. Para ello, se redujeron los albergues mineros y los trabajadores migrantes; se requirió la construcción de viviendas familiares y “subsidijs de subsistencia” a trabajadores no cualificados; se ingresó la asistencia médica como una deducción salarial. En el caso del distrito de Bojanala, esto trajo consigo que trabajadores se alojen en viviendas informales en un espacio limitado, lo cual llevo a una alta densidad demográfica y genero un efecto paralizante en los servicios e infraestructura (alcantarillado dañado constantemente y conexiones eléctricas ilegales), lo cual trajo consecuencias en el tema de salud pública (Cronje et al., 2013).

Las regulaciones en materia ambiental se orientan a la mitigación y remediación del impacto ambiental; la exposición de residuos o material peligroso a grandes comunidades humanas no es aceptable (Carvalho, 2017). Mantener un equilibrio entre los requisitos socioeconómicos y la protección al medio ambiente es algo que se regula mediante leyes que se orientan al beneficio del bien común, en Sudáfrica la población se enfoca más en la “supervivencia básica” que en el medio ambiente. Sin embargo, la responsabilidad de garantizar agua, viviendas y seguridad social fue delegada a las empresas mineras. Estas

nuevas regulaciones legales, que en un principio parecen alineadas al desarrollo sustentable, se ven obstaculizadas por la ineficiente administración de los ingresos que obtiene el gobierno por medio de impuestos y la corrupción (Sorensen, 2012).

Dado que la modernización de la minería comenzó al final del siglo XIX, lo que actualmente predomina se considera como una “industria madura”. Actualmente el panorama minero se compone de minas a cielo abierto y subterráneo, donde aún después de 100 años se extrae oro. Si bien la región aún produce grandes cantidades de recursos minerales energéticos y metales preciosos, también tiene un legado de más de 5000 minas abandonadas (Sorensen, 2012) y vertederos de desechos mineros (jales) que no están revestidos ni cuentan con vegetación, por lo que son una fuente de polvo con alto contenido en sílice (Iyaloo et al., 2020).

La conclusión de un proyecto minero debido al agotamiento de recursos minerales por fortuna ya no implica el retiro inmediato de la empresa minera, se requiere un “certificado de cierre” y garantizar provisión financiera del cierre y el posterior mantenimiento del sitio (Sorensen, 2012).

### **2.1.1. MINERÍA EN AMÉRICA LATINA**

A finales de los 80’s surgió interés por la minería Latinoamericana debido a los estrictos controles ambientales de países con economía central, a los altos costos de producción y al agotamiento de depósitos minerales (Armendáriz, 2016). En la década de los 90’s América Latina y el Caribe iniciaron la atracción de inversiones extranjeras para el beneficiar el desarrollo económico de diversos sectores, entre ellos el minero. Estos procesos fueron acompañados de cambio tecnológicos, para el sector minero representaba la oportunidad de buscar a nivel mundial oportunidades de menores costos y mejores condiciones de rentabilidad. Esto incentivo a América Latina a implementar reformas en el sector minero y con ello, se convirtió en el destino más importante para la exploración minera a nivel mundial (Polo, 2006).

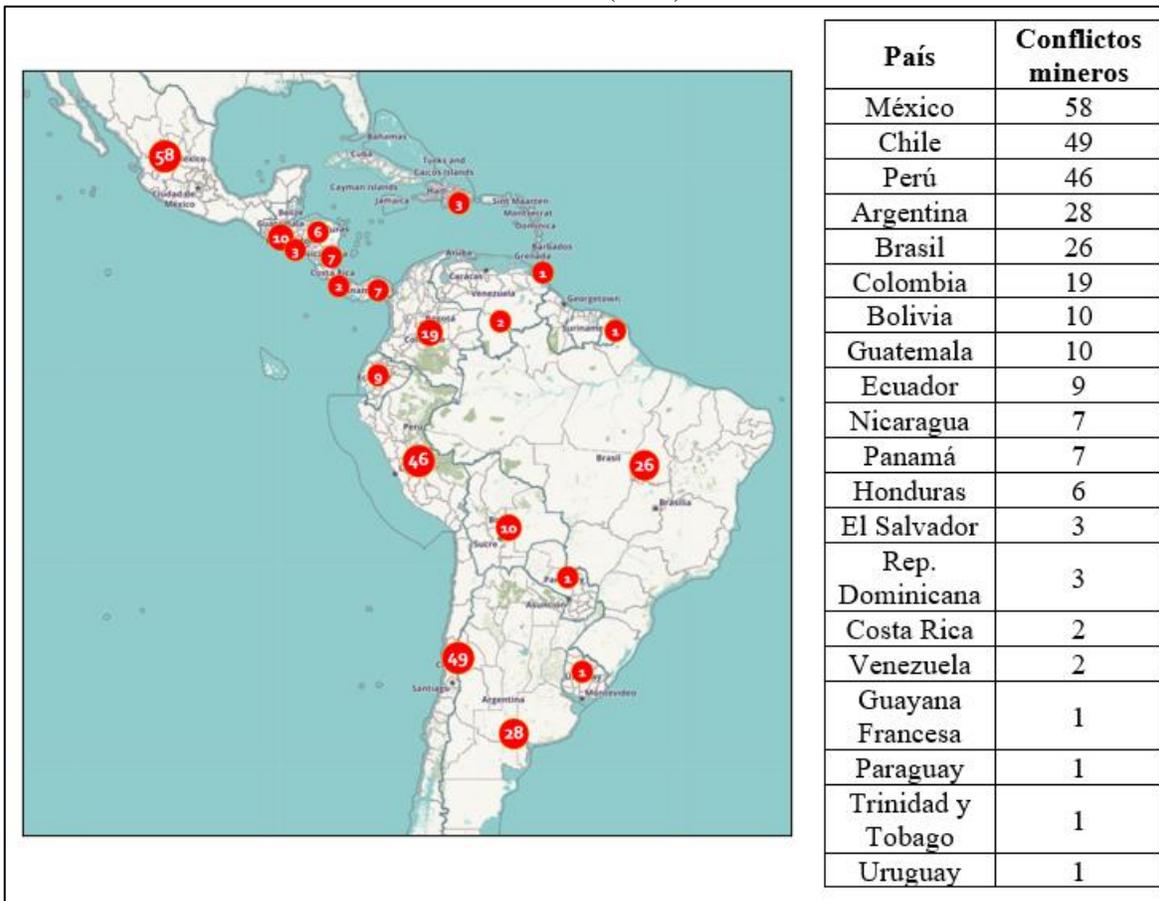
Posteriormente en la década de los 90’s, la principal limitación en la elaboración de nuevas legislaciones mineras fue el enfoque en la atracción de inversiones y la omisión del desarrollo en el aspecto socio ambiental. Debido al centralismo gubernamental y la competitividad entre

países, los beneficios a nivel local y regional por parte de la inversión minera no eran muy claros. Esto causó que las poblaciones circundantes de los proyectos mineros percibieran únicamente los costos o externalidades negativas. Sin embargo, es incongruente pretender que la minería pueda resolver gran parte de los problemas de la pobreza en los países productores, pero si representa una oportunidad orientada al desarrollo sustentable (Polo, 2006).

Aún con el incremento en la inversión extranjera en América Latina, las entonces recientes reformas no consideraron una forma de remediar las herencias negativas del sector minero o planes de cierre y su garantía de cumplimiento. A mediados de la década de los 90's y como una manifestación de los procesos de globalización, aparecen las primeras reformas ambientales y la exigencia de Estudios de Impacto Ambiental, el establecimiento de estándares ambientales, los Límites Máximos Permisibles y los procesos de participación ciudadana. Dichos asuntos aún se encuentran legislándose y adaptándose ante la creciente necesidad de alcanzar el supuesto desarrollo sustentable en las industrias extractivas (Polo, 2006). Sin embargo, a pesar de estos avances los conflictos mineros en América Latina continúan en ascenso (**Ilustración 3**).

En el caso de Perú, su industria minera ha crecido desde finales de los 90's y como consecuencia los recursos hídricos han sido objeto de conflictos, aunado al hecho de que la minería también se lleva a cabo en reservas de la biosfera (Silverio and Jaquet, 2009). Sin embargo, su participación en la economía nacional es innegable; en 2018 representó casi el 10% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, siendo el segundo productor de Cu, Ag y Zn a nivel mundial (Cruzado-Tafur et al., 2021).

A pesar de que Perú fue el primer país en América Latina en considerar un marco legal para pasivos ambientales mineros, no cuenta con una gestión adecuada de residuos mineros, su falta de regulaciones sobre el cierre de minas ha generado la acumulación de estos pasivos, que representan un riesgo para la salud y el medio ambiente y en ocasiones no cuenta con un responsable identificado. Esto llevó a alcanzar en 2019 un total de 8448 de pasivos ambientales (Cruzado-Tafur et al., 2021).



*Ilustración 3. Cantidad de conflictos mineros en América Latina*

En Bolivia, la minería también ha jugado un papel fundamental desde la época precolonial, a tal grado que muchos de sus asentamientos se desarrollaron alrededor de las minas. Aun con las variaciones del mercado, la demanda mundial mantiene el valor de negociación de sus recursos minerales sin importar que su actividad extractiva sea intensa ni el escaso o nulo control de la contaminación (Fontúrbel et al., 2011).

### **2.1.1.1. MINERÍA EN MÉXICO**

Históricamente la minería mexicana se ha caracterizado por tener ciclos de resurgimiento y decaimiento. Algunas capitales de los estados de México tienen en su origen un importante pasado minero durante la época colonial. Dentro del contexto histórico de la minería en México, se destacan tres implantaciones socio espaciales (Armendáriz, 2016):

- I. **Reales de mina.** Eran elaboradas redes de sociedades coloniales controladas por la Corona española. Se caracterizaban por el asentamiento de pueblos y ciudades alrededor

de las instalaciones mineras, donde la gente vivía y comerciaba de la riqueza de la minera. El declive de los reales de mina se debió al agotamiento de los yacimientos.

- II. **Minerales.** Fueron fundados por capital estadounidense principalmente. Se caracterizó por el asentamiento de pueblos mineros en zonas aisladas y desiertos. El modelo decayó después de que la minería cambió al esquema empresarial nacional por la inserción de los empleados a los sindicatos.
- III. **Etapas de pequeñas comunidades mineras en inestabilidad y simbiosis con la agricultura.** Este tipo de organización se presentó principalmente en estados de la Sierra Madre Occidental, contaba con territorios de difícil acceso y una notoria desconexión de servicios (fuentes de energía, comunicaciones), lo cual condicionó una pequeña y mediana escala de producción minera.

El marco legal minero de México es muy amplio (**Anexo A**). Sin embargo, debido a procesos de desregulación legal y privatización (como la reforma del **Artículo 27 constitucional**<sup>6</sup>) la estructura de la minería en México se desarrolló en tres sectores con dimensiones notoriamente desiguales (Armendáriz, 2016):

1. La minería monopólica de capital nacional.
2. Las empresas de origen canadiense.
3. Pequeñas y medianas empresas mineras.

La megaminería, minería industrial o gran minería no está definida dentro de la LM (2022) o su reglamento, por lo que se supone que es aquella que realiza un procesamiento por encima de **2,000 toneladas al día**<sup>7</sup>, escala que ha predominado en la última década en el sector (Armendáriz, 2016).

Las medidas de prevención de contaminación no son un requisito en México para obtener una concesión minera. Sin embargo, las normas de protección ambiental y reglamentos de seguridad de la Ley Minera (LM) sí figuran como una obligación (ELI, 2000). México carece

---

<sup>6</sup> Inicialmente la ley reglamentaria del Artículo 27 constitucional de 1971 se encargaba de regular la actividad minera. Su reforma se orientó hacia la Ley Minera en 1992 y al Tratado de Libre Comercio de América del Norte. ARMENDÁRIZ, E. J. 2016. *Áreas naturales protegidas y minería en México: perspectivas y recomendaciones*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

<sup>7</sup> Reglamento LM, Artículo 9, Fracc. II.

de un marco legal para las etapas post operativas, donde cabría esperar la restauración de los sitios afectados (Jimenez et al., 2006).

### **2.1.1.2.LEGISLACIÓN MINERA MEXICANA**

La LM vigente puede considerarse como un obstáculo para definir un nuevo modelo de desarrollo que defienda los intereses de la población mexicana, particularmente de los que habitan en territorios afectados por la minería. Se privilegia a concesionarios mineros por encima de cualquier otro interés que obstaculice el desarrollo de la minería, pareciendo incluso una omisión intencional de otros marcos normativos que involucren temas de derechos civiles y políticos. De acuerdo con el Artículo 6 de la LM (2022): la exploración y beneficio de los minerales o sustancias que se refiera esta ley son de utilidad pública, serán preferentes sobre cualquier otro uso o aprovechamiento del terreno, con sujeción a las condiciones que establece la misma, únicamente por ley de carácter federal podrán establecerse condiciones que graven estas actividades. Todo el territorio y las aguas nacionales pueden ser sujetos a concesión (terreno libre) (Cravioto, 2019).

La LM fue diseñada para establecer condiciones competitivas de las inversiones, enfocándose más en la promoción de la minería que a su control, dando prioridad a la actividad minera sobre cualquier otro uso, exceptuando la actividad petrolera o cualquier otro hidrocarburo. Ante la imposición del desequilibrio entre el crecimiento económico y la protección ambiental se subordina el derecho a un medio ambiente adecuado y los procesos de gobernanza (FUNDAR, 2002).

La legislación mexicana otorga al sector minero diversas ventajas legales que vulneran el medio ambiente (Armendáriz, 2016):

- Ausencia de obligatoriedad en auditorías ambientales, por lo que no hay enfoque preventivo y se impide un sistema de control de contaminación o sanciones por no aplicarlo, aplicando solo la normatividad vigente.

- Ausencia de un sistema de registro nacional de residuos mineros (jales, **tepetate**<sup>8</sup>, escorias, gases), dejando al SISCO y al Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes (RETC) insuficientes<sup>9</sup>.
- La LGEEPA y la LM no definen las etapas de cierre y abandono de proyectos mineros. En estos casos la Ley de Responsabilidad Ambiental ha sido insuficiente para alcanzar la reparación y compensación correspondiente y el que retomar las condiciones iniciales de los ecosistemas es posible.
- No puede prohibirse la actividad minera, la LM en su Art.6 establece que el uso de suelo es preferente para las actividades mineras sobre cualquier otro uso o aprovechamiento, incluso dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP).

Para el caso de residuos mineros, de acuerdo con la LGEEPA (última reforma en 2022) (Art. 108, fracc. III), se expedirán normas oficiales mexicanas que permitan llevar a cabo una adecuada ubicación y forma de relaves de las minas y establecimientos de beneficios de los minerales. En dicho caso, la NOM-157-SEMARNAT (2009), Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, establece que el generador de residuos debe llevar un plan de manejo orientado a la gestión integral de los residuos. Por lo que también se establece en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) (última reforma en 2021) (Art. 2, Fracc. IV) que el generador del residuo tiene la responsabilidad del pago del manejo integral y la respectiva reparación de los daños en caso de accidente o contaminación.

## **2.2. MINERÍA Y AMBIENTE**

Los nuevos proyectos mineros suscitan diversas opiniones. Debido a la globalización, la democratización y el acceso a la información, permite la actividad de las comunidades, organizaciones ecologistas y medios independientes, por lo que la negación a la minería es

---

<sup>8</sup> Residuos mineros generados durante la etapa de extracción AMBROCIO, E. D. L. L. 2017. *Uso de residuos mineros como relleno en minas subterráneas y criterios para un marco regulatorio*. UNAM.

<sup>9</sup> Recientemente SEMARNAT público un inventario de jales SEMARNAT. 2021. *Inventario Homologo Preliminar de Presas de Jales* [Online]. Available: <https://geomaticaportal.semarnat.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=95841aa3b6534cdfbe3f53b3b5d6edfa> [Accessed 2 de mayo 2022], SEMARNAT. 2022. *Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes* [Online]. SEMARNAT. Available: <http://sinat.semarnat.gob.mx/retc/retc/index.php> [Accessed].

un tema relativamente nuevo. Ya que estas han sido equipadas con las herramientas necesarias para luchar con las inversiones no deseadas (Badera, 2015). Este paradigma se basa en el argumento de que un mercado capitalista liberal facilita que ciertos abusos pasen inadvertidos o ignorados por el Estado, tal es el caso de las empresas mineras (Latif, 2019).

La industria minera ha legado en muchos países una amplia distribución de contaminantes, lo cual es un riesgo a la salud humana y al medio ambiente (Wuana and Okieimen, 2011). Este paradigma representa una causa de conflictos socioambientales y a su vez una transgresión a los derechos humanos, ya que en aras del desarrollo, las empresas mineras han llevado a cabo prácticas poco éticas tanto hacia la sociedad como hacia el medio ambiente (Camacho-Garza et al., 2022).

A grandes rasgos, el proceso de la minería consiste en la extracción de minerales de interés económico del subsuelo (**mena**<sup>10</sup>) y la separación de sedimentos no deseados (**ganga**<sup>11</sup>), generando grandes volúmenes de desecho que superan al mineral extraído. Como se observa en la **Ilustración 4**, a lo largo de todo el proceso de minería se generan diversos desechos que representan una amenaza potencial, tanto para la salud humana como para el medio ambiente (Armendáriz, 2016).

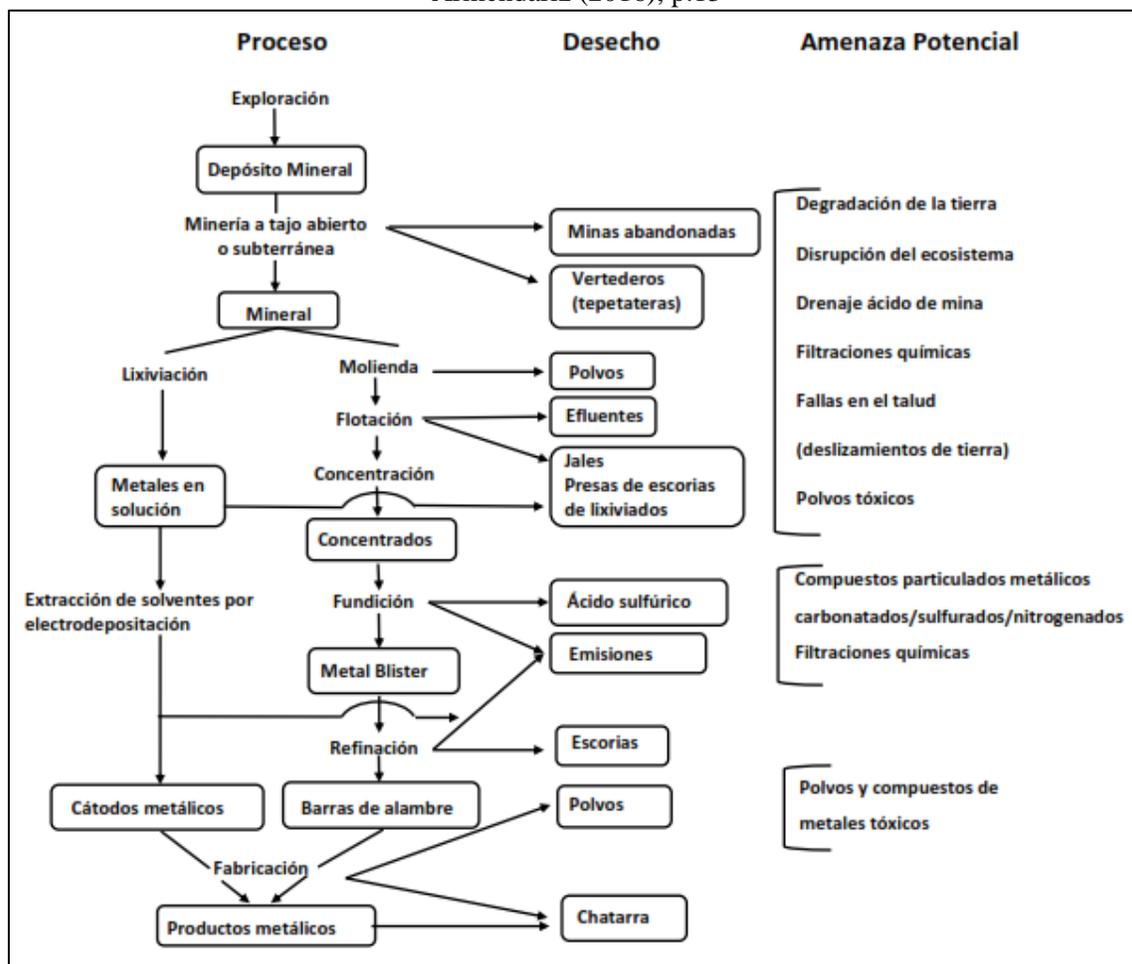
Durante las primeras actividades mineras se generan dos tipos de residuos: los estériles (o tepetate) y los jales, que como se ha mencionado, provienen de las operaciones primarias de separación y concentración de los minerales, entre las que se encuentran flotación, cianuración, concentración gravimétrica y concentración magnética y son almacenados en presas como opción para su disposición final.

La minería es de las prácticas más conflictivas con su entorno, actualmente se desconoce el número exacto de conflictos mineros en México. Sin embargo, de acuerdo con el Observatorio de Conflictos Mineros en América Latina (OCMAL) , México es el país con más conflictos mineros en América Latina (Camacho-Garza et al., 2022).

---

<sup>10</sup> Término usado comúnmente en minerales metálicos cuya explotación representa interés al momento de ser explotado.

<sup>11</sup> Es el mineral que acompaña a la mena y no representa interés minero al momento de su explotación. El material de ganga puede llegar a ser considerado mena al descubrirse alguna aplicación.



*Ilustración 4. Procesos, residuos y amenazas potenciales de la minería metálica*

La degradación ambiental que provoca la minería pone en riesgo a los grupos sociales más vulnerables. Siendo el medio ambiente la causa de conflictos entre la sociedad y las empresas (Latif, 2019). Cómo en cualquier actividad industrial, los contaminantes mineros se desplazan en el suelo, agua, aire y la biota **Tabla 7**.

*Tabla 7. Características de la contaminación minera*

Vector	Características
Paisaje	-Alteraciones físicas de una zona, normalmente irreversibles.
Suelo	-Desplazamiento lento y limitado en la mayoría de los casos, con el tiempo suficiente puede acumularse una gran cantidad de contaminante, generando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.
Aire	-Dispersión rápida de partículas atmosféricas (horas o días ). -Inhalación de partículas finas y su depósito en pulmones, generando altas dosis del contaminante. -Ingestión de partículas finas por medio de la nariz y la boca, se asocia a bajas dosis del contaminante. -Aumento en niveles de temperatura a causa del cambio climático afectara las regiones áridas y semiáridas aumentando la emisión de partículas.
Agua	-Suele limitarse a la extensión de las cuencas hidrográficas. -Los riesgos se concentran en zonas ribereñas, sistemas acuáticos y aguas subterráneas poco profundas. -Deposición de residuos.

Vector	Características
	-Los desechos pueden transportarse por medio de ríos y aguas subterráneas, causando contaminación secundaria y terciaria. -Sobreexplotación de agua subterránea.
Biota	-Debido a que no está limitado por barreras topográficas tiene mayor potencial de distribución debido a los movimientos migratorios, integrándose a la cadena trófica. -Su transporte es más lento debido a que requiere la metabolización de los contaminantes.

Fuente: Häberer (2002), Armendáriz (2016)

### 2.2.1. BROWNFIELDS

Al concluir la actividad minera se visualiza la herencia de pasivos ambientales. Las medidas para afrontar la falta de gestión de residuos mineros dependen de las circunstancias individuales de cada caso en particular. Consecuentemente puede evidenciarse la ausencia de políticas claras y respuestas por los organismos involucrados (Franks, 2011, Pokhrel and Dubey, 2013).

Una parte importante del desarrollo urbano sustentable es la regeneración urbana, es decir, la recuperación de sitios obsoletos, vacantes o contaminados, conocidos como *brownfields* (Domínguez, 2016) u *obliopatías*<sup>12</sup> (Contreras, 2016). Se implementa el término *brownfield* para evitar relacionarlo con características negativas; contaminación o abandonado (Domínguez, 2016).

Los brownfields son aquellos terrenos previamente utilizados o desarrollados y que actualmente están en desuso. Pueden ser sitios vacantes, abandonados o contaminados, por lo que no están disponibles para uso inmediato sin necesidad de intervención (Alker et al., 2000). La reintegración de los *brownfields* puede contribuir a la regeneración urbana como se observa en la **Tabla 8**.

En el caso de la presente investigación, los jales mineros pueden ser clasificados como brownfields ya que son terrenos que requieren ser rescatados en beneficio del desarrollo urbano sustentable, sin embargo, el contenido de EPT supone un riesgo para la población.

<sup>12</sup> Son aquellos espacios “olvidados” una vez concluida una actividad de modernización

*Tabla 8. Beneficios ambientales, sociales y económicos asociados a la regeneración de brownfields*

<b>Beneficios ambientales</b>	<b>Beneficios sociales</b>	<b>Beneficios económicos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir el consumo de reservas territoriales.</li> <li>• Protección de salud y seguridad pública.</li> <li>• Restauración de sitios subutilizados y establecimiento de nuevas áreas con valor ecológico.</li> <li>• Mejora de la calidad ambiental (suelo, aire).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renovación del tejido urbano.</li> <li>• Eliminación de percepción negativa de sitios por medio de la regeneración ambiental.</li> <li>• Creación de valor público.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atracción de inversión local o extranjera.</li> <li>• Aumento de la base de impuestos del gobierno.</li> <li>• Incremento de utilización de servicios públicos municipales.</li> </ul>
<p>• Fuente: Domínguez (2016), p.9</p>		

La disposición final de los residuos mineros conlleva conocer sus características, que incluyen las alteraciones producidas por los procesos metalúrgicos; los jales cuentan con una mineralogía heterogénea, que varía en cada depósito de minerales (Ambrocio, 2017).

### **2.2.2. JALES MINEROS**

La problemática en las malas prácticas de gestión de residuos mineros radica en el legado económico y ambiental que puede perdurar por periodos largos de tiempo (Franks et al. , 2011). Una constante de la conclusión de actividades mineras son los terrenos olvidados llenos de desechos inservibles, conocidos como jales, acumulados en “neomontañas” artificiales hechas por el ser humano (Reygadas and Sariago, 2009). Estos pasivos ambientales tienen un alto costo que es asumido por la sociedad y el Estado (Sánchez and Ortiz, 2014).

Los jales mineros (o relaves) son apilamientos de roca triturada que quedan después de haber extraído la mayoría de los minerales de interés económico. Posteriormente son almacenados dentro de presas o embalses que se construyen sobre terrenos planos o semiplanos, el sedimento que conforma los jales es transportado por medio de tuberías (Moreno Tovar, 1998, UA-SBRP, 2008). Habitualmente se generan en forma de lodos, para comportarse posteriormente como un suelo a diferencia de que su densidad y cuerpo son en un inicio bajos (Hernández, 2005).

Dichos “monumentos nefastos” son una de las razones por la cual la actividad minera es cuestionada e incluso suspendida, constituyen el aspecto más negativo de la vieja minería,

por ello se plantea la urgencia de generar la normatividad para remediarlos como un prerrequisito a la minería del futuro. Es en estos casos donde gran parte de la responsabilidad para remediar los pasivos ambientales recae sobre los gobiernos (Polo, 2006). Además de ser desechos contaminantes, los jales tienen el potencial de ser reservas de minerales con contenido de elementos susceptibles de ser recuperados con beneficio económico y ambiental (Moreno Tovar, 1998).

#### **2.2.2.1. JALES MINEROS Y SUS RIESGOS**

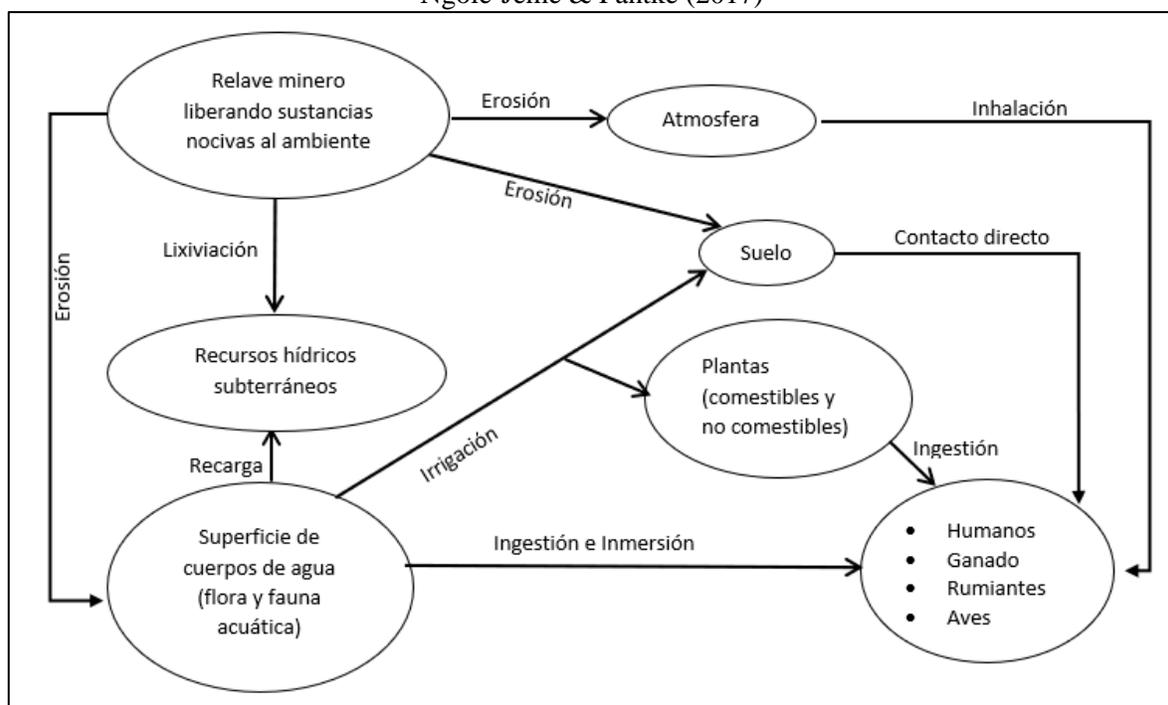
Sánchez-González and Egéa-Jiménez (2011), argumentan que los riesgos (tanto sociales como ambientales) implica el conocer qué es lo que amenaza al grupo o individuo y cuál es el grado o nivel de exposición al que están expuestos. Con base a ello y a otros factores, es posible definir las estrategias de adaptación a seguir, evidenciando la progresiva situación límite donde incluso se decide abandonar el lugar en el que se vive.

En el caso de los jales, su manejo y disposición inadecuada genera problemas ambientales en todo el mundo, como: la generación de drenaje ácido de roca acompañado de lixiviación de metales y metaloides; la falla en sus estructuras de retención, ocasionando avalanchas en las partes bajas y depósitos en los cauces de los ríos; dispersión eólica en relación con el tamaño de la partícula; y la contaminación visual en las zonas urbanizadas, brindando un aspecto deprimente debido a la falta de medidas de restauración (Moreno et al., 2009), a esto hay que sumar que son terrenos inhibidores de factores ecológicos y tóxicos para organismos vivos, en una escala de tiempo de largo plazo o incluso irreversible (Puga, et al., 2006, Adiansyah et al., 2015).

Los impactos generados por los jales son primordialmente a nivel local y se basan en las sustancias utilizadas en el tratamiento metalúrgico de recuperación y elementos solubles liberados del mineral, dichos componentes se asocian a EPT para el medio ambiente y la salud humana, tales como: Pb, As, Cd, Ni, Sb, entre otros (Moreno Tovar, 1998). La toxicidad de estos metales pesados no se basa esencialmente en sus características sino en las concentraciones en las que puede presentarse además de que no son química ni biológicamente degradables (García et al., 2009).

Más allá de afectar la vista panorámica, tienen el potencial de causar complicaciones tanto ecológicas como de salud humana, dispersándose a través de varias rutas (flora y fauna, recursos hídricos y atmósfera) especialmente si están abiertos, por ello tienden a ser absorbidos por raíces de cultivos, como se observa en la **Ilustración 5** (Puga et al., 2006, Ngole-Jeme and Fantke, 2017).

Ngole-Jeme & Fantke (2017)



**Ilustración 5.** Ilustración conceptual de las rutas del destino de las emisiones relacionadas con la minería de metales pesados y metaloides en el medio ambiente

La acumulación de metales pesados por bioacumulación es una forma de reducir su transporte y propagación. Consecuentemente genera efectos negativos en el medioambiente y así se incorpora al ser humano, mediante la ingestión de agua o la cadena alimentaria (Quiterio-Pérez et al., 2018).

Visualizándolo desde los pilares del desarrollo sustentable, la gestión de los jales mineros considera los problemas que se muestran en la **Tabla 9**.

*Tabla 9. Problemas de sustentabilidad en la gestión de jales*

Ambiental	Económico	Social	Gubernamental (regulación)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación de aire y agua.</li> <li>• Agotamiento de recursos hídricos.</li> <li>• Destrucción del ecosistema.</li> <li>• Alteración del ecosistema.</li> <li>• Huella en el suelo.</li> <li>• Emisiones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gastos de capital.</li> <li>• Gastos de operación.</li> <li>• Pérdida de reactivo.</li> <li>• Costo energético.</li> <li>• Costo de cierre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de salud.</li> <li>• Cuestiones de seguridad para el público (después del cierre).</li> <li>• Percepción de los interesados.</li> <li>• Impactos culturales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complicidad legal.</li> </ul>
<p>Fuente: Adiansyah et al. (2015)</p>			

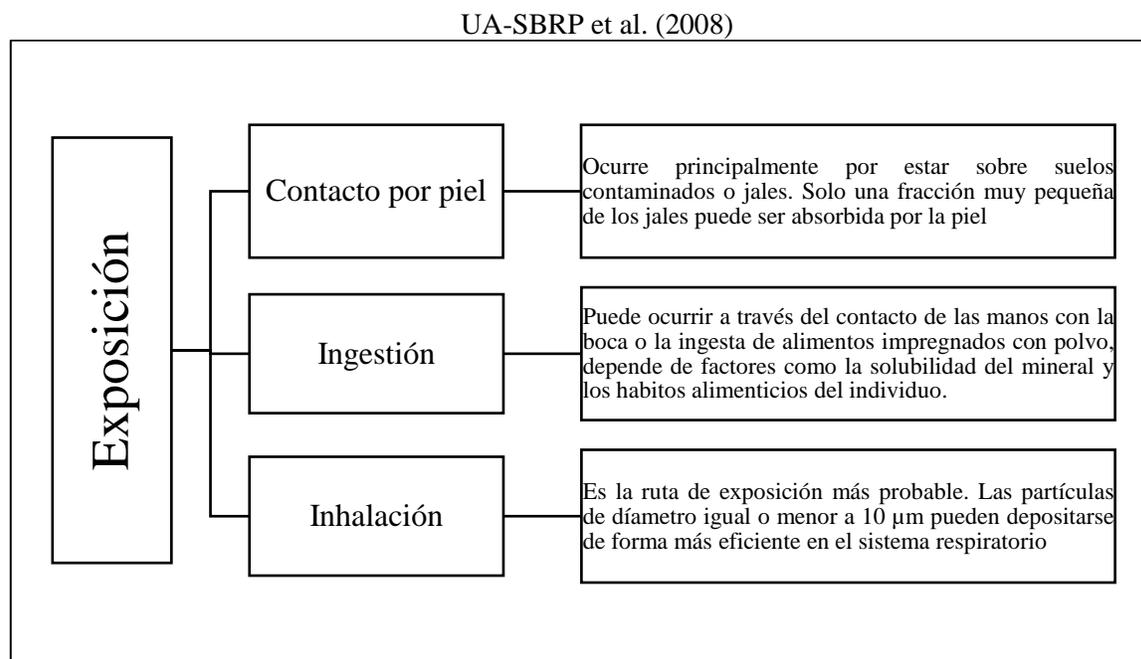
### 2.2.2.2. RIESGOS A LA SALUD HUMANA

Dentro de las ciencias ambientales se encuentra la salud ambiental, que se ocupa del estudio de los riesgos y efectos que representa el medio que se habita, donde se labora, las alteraciones tanto naturales como antropogénicas que el lugar manifiesta y las alteraciones en la calidad ambiental. **Gran parte de las enfermedades causadas por el medio ambiente no son diagnosticadas y por lo tanto no son tratadas** (García, 2009).

En los procesos de molienda en la generación de jales, las grandes rocas son reducidas a material fino que puede ser suspendido en la atmósfera por acción del viento y ser dispersado. Estos polvos pueden llegar a contener altas concentraciones de material potencialmente peligroso, llegando a medir menos de 2.5 µm (micrómetros), siendo un factor muy importante en cuanto a la dispersión y transporte (UA-SBRP et al., 2008).

Al analizar los efectos de la contaminación de suelos se toma en cuenta el riesgo para la salud humana, generalmente estos riesgos pueden interpretarse como riesgos cancerígenos y no cancerígenos (Guan et al., 2017). En el caso de metales pesados además de ser cancerígenos tienen el potencial de más complicaciones a la salud humana, incluyendo daños en la piel, riñones, pulmones, huesos, intestinos, incluso un bajo conteo de espermatozoides (Ngole-Jeme et al., 2017). Dependiendo del tiempo de exposición y el tipo de polvo es que puede estimarse el daño potencial a la salud humana. Las personas expuestas a partículas finas por periodos largos de tiempo pueden desarrollar enfermedades respiratorias y daños en los pulmones (UA-SBRP et al., 2008).

Debido a estas características, los polvos de los jales mineros pueden llegar a afectar la salud humana por exposición con la piel y con los sistemas respiratorio y digestivo, como se observa en la **Ilustración 6** (UA-SBRP et al., 2008).



*Ilustración 6. Medios de exposición de los jales*

La exposición crónica a EPT genera diversas respuestas en todos los niveles de organización biológica, mismas que comprometen la salud del individuo (Sánchez and Ortiz, 2014), algunos de sus efectos en la salud humana se presentan en la **Tabla 10**.

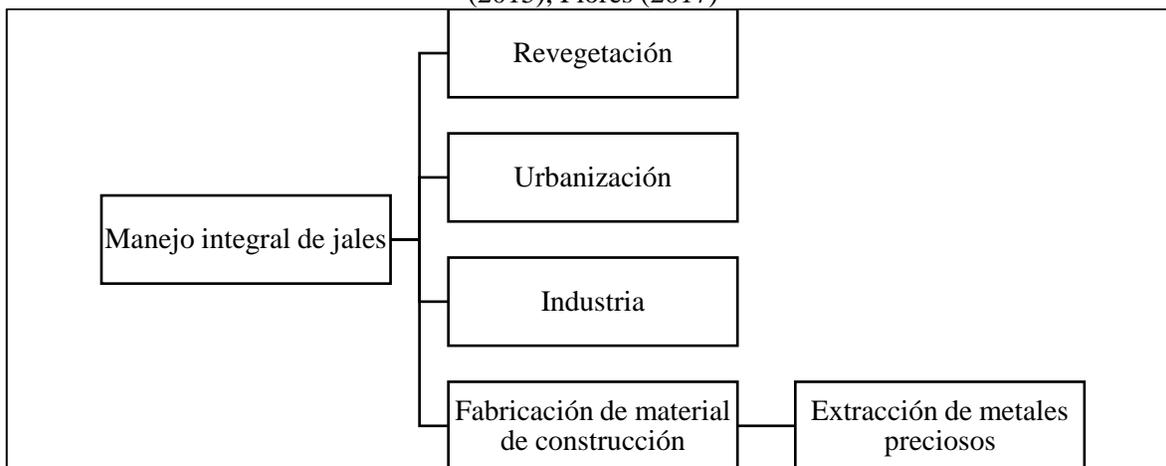
Como se muestra en la **Ilustración 7**, son diversas las alternativas que pueden implementarse para llevar a cabo un manejo integral de los jales. Estudios anteriores de caracterización de los jales de Pachuca, han llegado a la conclusión de que algunas especies vegetales tienen la capacidad de reducir la disposición de los elementos potencialmente tóxicos en el suelo y aire, por lo que la revegetación de la superficie de los jales indica ser una estrategia viable para mitigar el impacto ambiental (Hernández-Acosta et al., 2009) y fomentar la proliferación de vegetación nativa si las condiciones del suelo lo permiten (Ramos-Arroyo and Siebe-Grabach, 2006).

**Tabla 10. Efectos de metales pesados en la salud humana**

Elemento	Efectos en la salud humana
Pb	Acumulación en los organos. Lesiones en sistema nervioso, riñones y glóbulos rojos. Pérdida de memoria. Náuseas. Insomnio. Anorexia. Debilidad en articulaciones. Disminución en tiempo de reacción. Riesgo de deterioro en el desarrollo infantil. Pérdida de cabello. Fibrosis pulmonar. Alergias. Tiende a almacenarse en huesos por periodos largos de tiempo. No es esencial para el ser humano.
Cr	Dermatitis alérgica. Daño a vías respiratorias. Daño en riñones. Trastornos gastrointestinales, pulmonares y del sistema nervioso central. Afecta fertilidad. Riesgo de cáncer. Causa reacciones alérgicas. Hemorragias nasales. Mutaciones.
Co	Diarrea. Náuseas. Vómito. Daño cardiovascular, óptico y tiroideo. Deformación ósea. Incidencia de bocio.
Mn	Anemia. Hipertensión. Trastornos neurológicos y respiratorios. Depósito en hígado, riñones, páncreas y glándulas endocrinas.
As	Daño en la piel. Riesgo de cáncer. Necrosis. Gangrena. Problemas del sistema circulatorio.
Fe	Náuseas. Vómitos. Dolor abdominal. Diarrea. Necrosis intestinal. Peritonitis. Trastornos genéticos y metabólicos. Enfermedades pulmonares.
Zn	Defectos de nacimiento cuando escasea. Deshidratación. Desequilibrio electrolítico. Dolor de estómago. Diarrea. Letargo. Mareos. Falta de coordinación muscular. Insuficiencia renal. Esencial para la salud humana.
Cd	No tiene función biológica. Afecta las vías urinarias. Acumulación y daño en hígado, riñones y huesos. Produce alteraciones gastrointestinales. Reduce actividad enzimática. Altera el metabolismo del Ca. Provoca retraso en el crecimiento. Diarrea. Trastorno del sistema nervioso central.
Cu	Náuseas. Dolor abdominal y de cabeza. Anemia. Daño hepático y renal. Irritación del tubo digestivo. Alergias. Caída de cabello. Desorden gastrointestinal. Riesgo de cáncer.
Hg	Fallo respiratorio. Problemas de visión y audición. Náuseas. Vómito. Diarrea. Daño renal y al sistema nervioso. Neurotoxicidad.
Ni	Dermatitis. Náuseas. Diarrea. Dolor de cabeza. Vómitos. Dolor de pecho. Deterioro de pulmones y riñones. Riesgo de cáncer.

Fuente: Wuana & Okieimen (2011), Camarrilla (2014), Su et al. (2014), Izah et al. (2016)

Modificado de Hernández-Acosta et al. (2009), Krzysztofik et al. (2012), Camarrillo (2014), Learita (2015), Flores (2017)



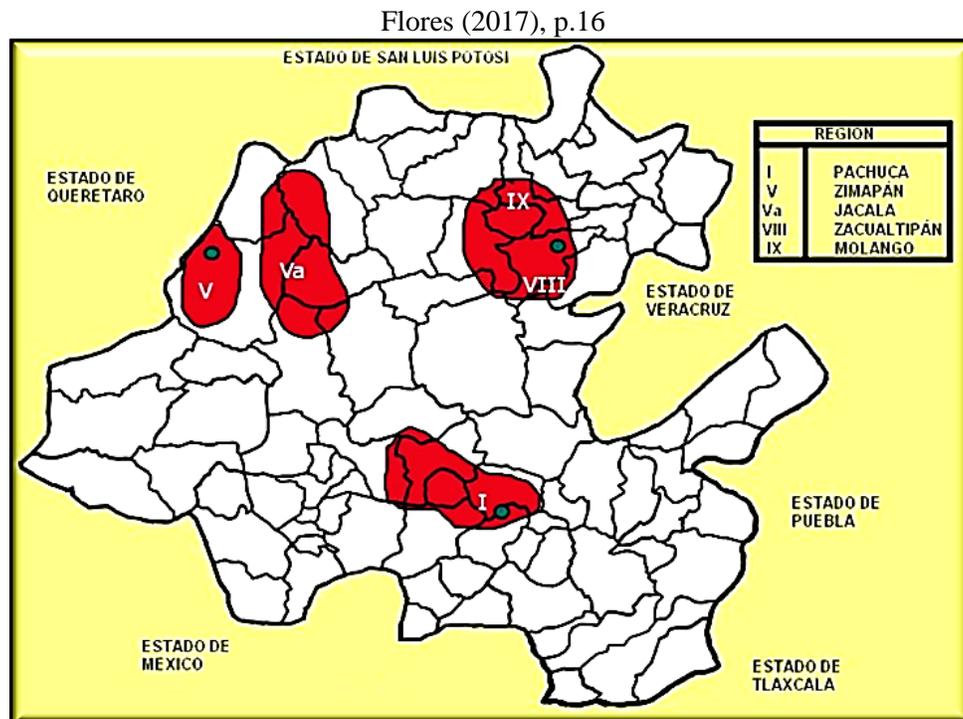
**Ilustración 7. Manejo integral de jales**

### 2.3. MINERÍA DEL ESTADO DE HIDALGO

Hidalgo es un estado con un pasado minero de casi 500 años, siendo una de las entidades federativas más importantes para el desarrollo minero de México (SGM, 2020). Limita al norte con San Luis, Veracruz y Querétaro, al este con Puebla y Veracruz, al oeste con

Querétaro y al sur con Tlaxcala y México. Cuenta con una superficie de 20,905km<sup>2</sup>, lo cual representa el 1.1% del territorio nacional y se encuentra dividido en 84 municipios. El 70% de su territorio se ubica en la Sierra Madre Oriental y el resto en el Eje Neovolcánico y en la Llanura Costera del Golfo de México (SGM, 2017).

Hidalgo cuenta con cinco regiones mineras: Pachuca, Zimapán, Jacala, Zacualtipán y Molango, como se observa en la **Ilustración 8**.



*Ilustración 8. Zonas mineras del estado de Hidalgo*

Han existido seis periodos de explotación minera en el estado de Hidalgo (Flores, 2017):

1. Primeros 200 años después de la conquista española.
2. Periodo del proyecto de drenado a la Guerra de Independencia (1738-1810).
3. Periodo de modernización bajo administración inglesa, mexicana y estadounidense (1821-1906).
4. Periodo bajo operación privada (1906-1947).
5. Prolongación de la vida productiva del distrito minero bajo administración del gobierno mexicano (1947-1990).
6. Administración privada del Grupo Acerero del Norte a través de la Cía. Real del Monte y Pachuca (1990-actualidad).

De acuerdo con medios periodísticos, en 1552, se registró la primera mina en el estado de Hidalgo, “La Descubridora”, ubicada en el cerro de la Magdalena, iniciando la minería del estado. En la historia minera de Hidalgo, se considera que la aportación más importante fue la implementación de la técnica de amalgamación en 1555 por el Fray Bartolomé de Medina. Posteriormente en 1823 se fundó la compañía minera Compañía Británica de Real del Monte y en 1824 se creó la Compañía de Aventureros de las mineas de Real del Monte, misma que desapareció en 1849 para dar lugar a la Compañía Aviadora de Real del Monte y Pachuca (SGM, 2020). Sin embargo, las actividades de exploración y explotación intensiva y sistemática iniciaron a principios del siglo XX. Hasta el año 1963, el volumen de extracción fue de 3000 a 4000 ton/día (Moreno et al., 2009). A pesar del periodo de auge minero, no fue suficiente para promover el desarrollo de la ciudad (Escalona, 2017).

La actividad minera brindó importantes beneficios socioeconómicos al estado de Hidalgo hasta el siglo XIX. De manera progresiva, las actividades económicas se desplazaron a finales del siglo XIX a los municipios de Molango, Zimapán, cementeras en Tula, textilerías en Santiago Tulantepec y Tulancingo. En los 60's se establecieron más zonas industriales en Tizayuca, Tula, Pachuca, Tulancingo y Cd. Sahagún con la finalidad de reactivar la economía estatal (Cabrera-Cruz et al., 2003).

Durante el siglo XX la Zona Metropolitana de Pachuca, perdió progresivamente su actividad minera, pasando a tener una vocación principalmente administrativa a nivel estatal (SEDESOL, 2013). A finales del siglo XX, la mayoría de las empresas mineras y haciendas de la región cerraron debido al desinterés en la extracción de la plata, quedando su infraestructura en desuso y abandonada. En 1990, dicha infraestructura fue restaurada para ser adaptada como archivos históricos y museos (Contreras, 2016).

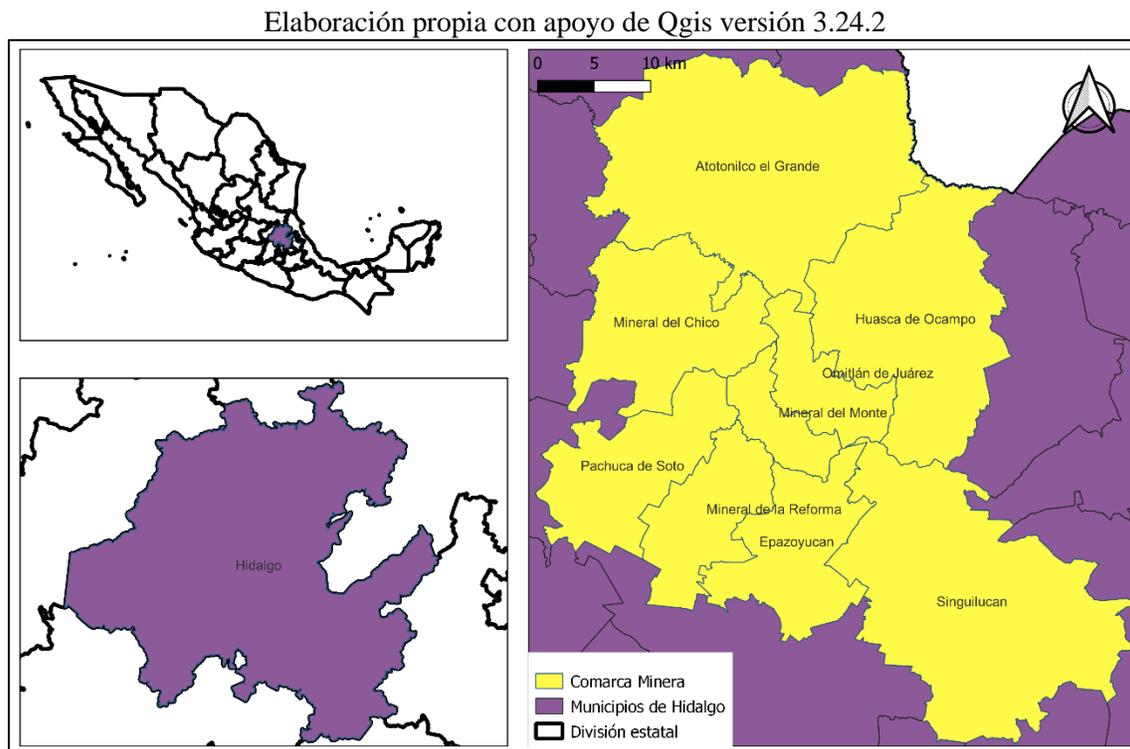
En la actualidad la actividad extractiva es poca y se realizan procesos de beneficio de los jales para obtener el mineral restante, mismo que en su momento no fue extraído debido a la insuficiencia tecnológica a principios y mediados de siglo (Contreras, 2016).

### **2.3.1. LA COMARCA MINERA**

La Comarca Minera de Hidalgo fue clasificada como un Geoparque Mundial por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)

desde 2017, estos sitios se caracterizan por contar con un “geopatrimonio sobresaliente” o geositios con importancia internacional cuyo uso promueve el desarrollo sustentable a través del geoturismo, educación y cultura.

La Comarca Minera cuenta con un área de 1848 km<sup>2</sup> y abarca los municipios de Atotonilco el Grande, Epazoyucan, Huasca de Ocampo, Mineral de la Reforma, Mineral del Chico, Mineral del Monte, Omitlán de Juárez, Pachuca de Soto y Singuilucan (Canet et al., 2017), como se observa en la **Ilustración 9**.



*Ilustración 9. Municipios que conforman la Comarca Minera de Hidalgo*

De acuerdo con el último censo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comarca Minera cuenta con 613,604 habitantes, lo cual representa casi el 20% de la población total del estado de Hidalgo. En total, La Comarca Minera cuenta con 31 geositios de interés (**Tabla 11**).

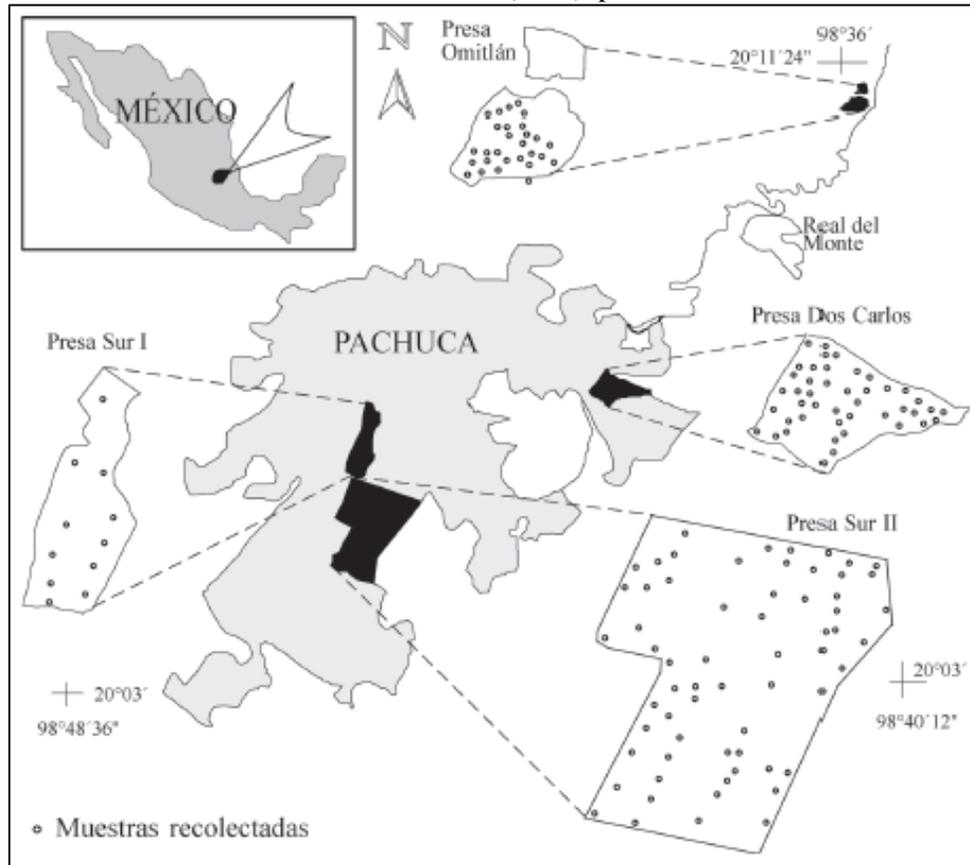
**Tabla 11.** Listado de geositios del Geoparque Comarca Minera, Hidalgo (UTM Zona 14. WGS84)

N°	Geosítio	Coordenadas UTM		Municipio
		X	Y	
1	Prismas Basálticos	545602	2237490	Huasca de Ocampo
2	Museo de Mineralogía	527774	2225690	Pachuca de Soto
3	Depósitos volcánicos de El Chico	529658	2231782	Mineral del Chico
4	Depósitos tobáceos de Cubitos	527735	2222552	Pachuca de Soto
5	Obras mineras de El Milagro	527532	2235850	Mineral del Chico
6	Cerro de las Navajas	546679	2221034	Epazoyucan
7	Peñas Cargadas	539026	2224170	Epazoyucan
8	Aguas termales de Amajac	529857	2245429	Atotonilco El Grande
9	Peña del Diablo-Piedra del Comal	536510	2230030	Omitlán de Juárez
10	Presa San Antonio	545425	2237390	Mineral del Monte
11	Mirador Cerro del Lobo	528794	2225080	Pachuca de Soto
12	Peña del Aire (Mirador El León)	550921	2240782	Huasca de Ocampo
13	Traquita El Guajolote	541883	2223119	Epazoyucan
14	Peñas Las Monjas	525532	2234710	Mineral del Chico
15	Cantera Tezoantla	537659	2224480	Mineral del Monte
16	Cerro de San Cristóbal	527250	2227082	Pachuca de Soto
17	Estructuras volcánicas de La Paila	551465	2215578	Singuilucan
18	Peña del Cuervo	529464	2234133	Mineral del Chico
19	Presa de El Cedral	526210	2231672	Mineral del Chico
20	Mirador de Las Ventanas	527587	2232201	Mineral del Chico
21	Barranca de Aguacatitla	547038	2239383	Huasca de Ocampo
22	Parque Estatal Bosque El Hiloche	533063	2227379	Mineral del Monte
23	Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán	540645	2249000	Atotonilco El Grande
24	Cristo Rey	529036	2225887	Pachuca de Soto
25	Reloj Monumental	528035	2225614	Pachuca de Soto
26	Museo del Paste	533002	2226895	Mineral del Monte
27	San Miguel Regla	546311	2235610	Huasca de Ocampo
28	ExHacienda La Purísima	528534	2226498	Pachuca de Soto
29	ExConvento de San Andrés Apóstol	538170	2213450	Epazoyucan
30	Panteón Inglés	534803	2226785	Mineral del Monte
31	ExConvento de San Agustín	534566	2243180	Atotonilco El Grande

Fuente: Canet et al. (2017)

El área cuenta con 4 depósitos de jales mineros, de los cuales tres se encuentran dentro del área urbana de Pachuca y la presa Velasco en Omitlán de Juárez (Salinas-Rodríguez, et al., 2017), como se observa en la **Ilustración 10**.

Cabe mencionar que un Geoparque no es como tal una designación legislativa formal, aunque es requisito que su patrimonio geológico debe estar protegido por la legislación indígena, local, regional o nacional según corresponda. Sin embargo, esto no restringe ninguna actividad económica dentro del territorio del Geoparque mientras se cumpla la legislación correspondiente (UNESCO, 2020).



*Ilustración 10. Localización en el distrito minero Pachuca – Real del Monte, las presas de jales Omitlán, Dos Carlos, Sur I y Sur II, estado de Hidalgo*

## 2.4.URBANIZACIÓN DE LOS JALES

Los planes de desarrollo en la Zona Metropolitana de Pachuca se han enfocado desde la parte sur hasta el arco norte, esto es visible al observar el crecimiento de la mancha urbana en los últimos 30 años de los municipios que conforman la Zona Metropolitana. Actualmente Pachuca ha ocupado casi la totalidad de su territorio, por lo que se encuentra en un proceso de densificación (Escalona, 2017).

La mancha urbana de Pachuca de Soto se extendió sobre la microcuenca del río de las Avenidas y desde sus orígenes la actividad minera ha dirigido las etapas de desarrollo urbano (Contreras, 2016):

1. Descubrimiento de las minas, propicio la migración de gente de las poblaciones cercanas hacia Pachuca de Soto. Se aplicó un modelo de “plato roto” debido a la imposibilidad de aquel entonces de cumplir con las especificaciones y ordenanzas de la traza urbana.
2. Auge minero debido a la explotación de vetas no mejoró el desarrollo urbano de Pachuca de Soto en los siglos XVII y XVIII.
3. En la primera mitad del siglo XIX se constituyó Pachuca de Soto como capital del estado de Hidalgo debido a la Constitución del Estado de Hidalgo. Ocurrió migración de ingleses a la región con el fin de explorar las minas, lo cual generó un crecimiento en el número de minas y haciendas y la construcción de templos metodistas, el panteón inglés y campos de fútbol.
4. Durante el porfiriato se realizó la construcción de monumentos como el reloj monumental de la plaza independencia y la fachada del panteón municipal y se anexó la red de ferrocarriles que conectaban con México y los distritos mineros.
5. A la mitad del siglo XX ocurre el decaimiento de la actividad minera y el cierre de empresas, ocasionando un estancamiento del desarrollo urbano.
6. Debido al terremoto de la Ciudad de México, Pachuca de Soto presentó un crecimiento acelerado a partir de 1980 teniendo consecuencias alarmantes: asentamientos humanos con déficit en las normas de calidad, invasión de áreas naturales protegidas, reconstrucción del centro histórico, insuficiencia en el abastecimiento de servicios públicos e infraestructura y atentados hacia el medio ambiente, dicho crecimiento estuvo orientado en dirección hacia el sur, apuntando hacia la Ciudad de México.
7. En los 80's la mancha urbana comenzó a rodear los jales y para finales del siglo XX, se comenzó a urbanizar sobre ellos, abarcando la mitad de las casi 400 hectáreas que ocupan los jales, tendencia que perdura en la actualidad, pretendiendo llevar a cabo un proyecto habitacional.

Las presas de jales yacen sobre la superficie del suelo, la cual no contó en su momento con un tratamiento previo a su depósito. Sin embargo, debido a la intermitencia de los arroyos y ríos de la localidad, su interacción con el sistema hidrológico es mínima (Moreno et al., 2009). Los jales que pertenecen a la Región Minera de Pachuca ocupan una superficie de 1200 hectáreas aproximadamente. Se considera que existen alrededor de 108.1 millones de toneladas métricas de escombrera, **Tabla 12** (Flores, 2017).

*Tabla 12. Distribución de peso de material en cada escombrera*

	<b>Presa</b>	<b>Millones de toneladas métricas</b>
Santa Julia	Presa Norte o Sur I	19.9
	Presa Sur o Sur II	69.5
	Coscotitlán	0.6
	Dos Carlos	14.3
	Velasco	3.8
Fuente: Flores (2017)		

Los principales depósitos de jales se ubican al sur del estado; en Pachuca se ubican en Santa Julia (Presa Norte y Sur) y Coscotitlán en la parte sur del municipio, Dos Carlos en la parte noreste, a un costado de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y Velasco en el municipio de Omitlán de Juárez, en la comunidad Velasco. Cabe mencionar que la presa Coscotitlán ha sido reprocesada y además los terrenos del estadio Miguel Hidalgo y el fraccionamiento La Moraleja están asentados sobre la presa Santa Julia Norte (Sur I), parte del material de dicha escombrera ha sido trasladado a la presa Sur II (Flores, 2017).

De acuerdo con Moreno Tovar (1998), los jales pueden clasificarse de dos maneras:

1. **Antiguos.** Totalmente secos en la actualidad y pueden formar parte del medio ambiente o un entorno urbano.
2. **Actuales.** Aquellos que están en plena actividad en zonas mineras activas, va del estado acuoso a subacuoso.

Dicha clasificación se debe a que los jales fueron generados en distintos periodos históricos, por lo que hubo avances tecnológicos en las técnicas de extracción y separación (Flores, 2017):

- a. Explotación rudimentaria, conocida como beneficio de patio (molienda-amalgamación) por 353 años.
- b. Explotación por medio de molienda-cianuración por 47 años.
- c. Explotación intensa de molienda-flotación-cianuración por 74 años.

Obviamente los residuos más antiguos son los que se encuentran en la base del depósito y son los que presentan mayor contenido de Ag y Au.

Los yacimientos Pachuca de Soto-Real del Monte forman parte de los distritos más antiguos de México, la acumulación de sus desechos de minería se ha venido llevando a cabo desde 1528, donde Bartolomé de Medina desarrollo la técnica de recuperación de plata por medio del mercurio, lo cual permitió procesar mineral de relativa baja ley a grandes volúmenes, iniciando la generación y acumulación de los jales (Moreno Tovar, 1998). Sin embargo, en 1912, varias empresas del distrito minero contemplaron que sería conveniente almacenar los jales, en espera de la elaboración de una técnica que permitiera recuperar el mineral que aun contenía, por lo que se formó la Asociación de Compañías Beneficiadoras de Pachuca S.C.L. y posteriormente, en 1924, los jales comenzaron a ser acumulados en lo que hoy se conoce como Santa Julia, alcanzando en 1959 un volumen aproximado de 55 millones de toneladas (Contreras, 2016).

Estos depósitos que han perdurado por más de cuatro siglos presentan muchos problemas, debido a su baja resistencia, que pone en riesgo las infraestructuras que están sobre ellos, aunado a la dificultad del crecimiento de vegetación sobre su superficie. Esto permite que el viento levante tolvaneras que contienen EPT, mismos que pueden ser perjudiciales para la salud, representando un riesgo para el desarrollo urbano asentado sobre ellos y sus anexos (Hernández-Acosta et al., 2009).

Los altos niveles de vulnerabilidad física, principalmente en la porción noreste de Pachuca de Soto donde es la ladera de la montaña, se debe a la concentración y disposición de componentes climáticos, estructurando así una red pluvial intermitente de fuerte actividad. A pesar de que esta misma geomorfología fue la determinante física para el trazo de la ciudad y el establecimiento de los primeros pobladores, las pendientes pronunciadas al noreste son las principales causantes de inundaciones (Escalona, 2017).

Los jales mineros son propiedad de la empresa Compañía Real del Monte y Pachuca que, debido a la decadencia de la actividad minera y la ubicación favorable de estos terrenos, se construyeron los fraccionamientos La Moraleja (2000) y Puerta de Hierro (2001) y se dejaron terrenos para construir mobiliario urbano como escuelas privadas de nivel básico (2004) y un Centro de Rehabilitación Infantil (2005), además de continuar construyendo otros fraccionamientos, centros comerciales y demás zonas culturales y recreativas en la periferia (Contreras, 2016).

En 2011 se llevó a cabo la última construcción sobre los jales en el depósito perteneciente de Santa Julia; un gimnasio denominado Fitness Sport. Dicha construcción requirió retirar material de los jales para nivelar la construcción al nivel de la calle. En 2011, el gobierno estatal autorizó la construcción del fraccionamiento El Fénix sobre la presa Sur (que es la única que no se ha urbanizado, mientras que sobre la presa Dos Carlos se construirá el fraccionamiento Dos Carlos. Alrededor de los jales también se ha construido la plaza comercial Gran Patio (2011) (Escalona, 2017).

Como hace referencia Flores (2017), transformar y/o eliminar los jales significaría resolver el problema de contaminación, el cual es más perceptible en los meses de febrero y abril y ocasionalmente en noviembre, debido al levantamiento de polvos originado por los fuertes vientos. Además de reducir los riesgos a enfermedades respiratorias de los habitantes de las zonas aledañas. Sin embargo, dicho escenario solo será posible a través de un cambio en las políticas ambientales actuales.

### **2.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS JALES**

Se han realizado diversos estudios sobre caracterización física y química de los jales mineros de Pachuca de Soto (**Tabla 13**).

Las muestras tomadas en dichos estudios de los jales fueron sometidas a diversas pruebas de análisis químico cuantitativo para determinar sus concentraciones de elementos traza y mayores; XRD, ICP, XRF, AAS, EDS, NOM-053-ECOL y EPA13-12. Los resultados de los análisis realizados en las presas Dos Carlos, Sur I y Sur II se observan en las **Tablas 14 a 17**.

A pesar del consenso sobre la peligrosidad de los jales para la salud humana y el medio ambiente, este nexo ha sido un tema poco abordado en Pachuca de Soto, Hidalgo. Si bien se han realizado pruebas de caracterización física y química para conocer su concentración de EPT (Moreno Tovar, 1998, Hernández-Acosta et al., 2009, Moreno et al., 2009), pruebas de lixiviación para determinar su movilidad (Hernández et al., 2013, Hernández et al., 2014), el efecto de su presencia para el desarrollo urbano (Contreras, 2016, Contreras et al., 2019) e incluso el riesgo de hundimientos para infraestructuras construidas sobre los jales (Silva, 2006), poco se ha escrito acerca de sus efectos para salud humana (Lizárraga-Mendiola et al., 2014), el riesgo para el medio ambiente o su relación con las políticas públicas. Aún a pesar de la evidente problemática, la población decide por

voluntad propia vivir y realizar sus actividades cotidianas sobre o cerca de los jales mineros (Contreras, 2016).

*Tabla 13. Referencias sobre caracterización de los jales*

<b>Título</b>	<b>Referencia</b>	<b>Área analizada</b>
Caracterización mineralógica y química de desechos mineros (jales), aplicada a la recuperación de valores económicos en Zimapán y Pachuca, Estado de Hidalgo (Tesis inédita de Maestría).	(Moreno Tovar, 1998)	Pachuca y Zimapán (no específica cuales jales).
Evaluación geoquímica de residuos mineros (jales o colas) de mineralización de tipo epitermal, Hidalgo, México.	(Moreno et al., 2009)	Presas Dos Carlos, Sur I, Sur II y Omitlán.
Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México.	(Hernández-Acosta et al., 2009)	Presa Dos Carlos.
Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema $S_2O_3^{2-}-O_2-Cu^{2+}$ Contenido en Residuos Minero-Metalúrgicos.	(Hernández et al., 2013)	Presa Dos Carlos.
Leaching kinetics in cyanide media of Ag contained in the industrial mining-metallurgical wastes in the state of Hidalgo, Mexico.	(Hernández et al., 2014)	Presa Dos Carlos.
Recuperación de sílice a partir de los jales del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, en el Estado de Hidalgo y su utilización como material de construcción.	(Flores, 2017)	Presa Dos Carlos.
Corrosion Study in Reinforced Concrete Made with Mine Waste as Mineral Additive.	(Volpi-León et al., 2017)	Presa Sur (no especifica si I o II).
Reprocessing of Mining Wastes for the Recovery of Silver by Leaching in the Thiosemicarbazide–Oxygen System.	(Hernández-Ávila et al., 2018)	Velasco.
Caracterización del suelo de un desarrollo habitacional sobre residuos mineros de Pachuca de Soto, Hidalgo.	(Contreras et al., 2019)	Fraccionamiento Puerta de Hierro (construido sobre jales).

Fuente: elaboración propia

**Tabla 14.** Caracterización química de la presa Dos Carlos.

<b>Dos Carlos</b>								
Elemento	Fuente: Moreno et al. (2009)					Fuente: Hernández et al. (2013)		
	ICP		NOM-053-ECOL-1993*		EPA13-12*		XRD-XRF-ICP-AAS	
	Promedio (mg/kg)	%	Promedio %	Promedio (mg/L)	%	Promedio (mg/L)	%	%
<b>Pb</b>	340	0.929	-	0.489	1.044	0.029	0.141	-
<b>Zn</b>	688.6	1.881	-	15.594	33.303	3.669	17.871	-
<b>Cu</b>	66.3	0.181	-	0.399	0.852	0.179	0.872	-
<b>Fe</b>	31020	84.729	-	0.68	1.452	0.186	0.906	-
<b>Mg</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Mn</b>	3925	10.721	-	29.331	62.64	16.299	79.387	-
<b>Sc</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cd</b>	4.1	0.011	-	0.223	0.476	0.048	0.234	-
<b>As</b>	4.8	0.013	-	0.005	0.011	0	0	-
<b>Bi</b>	1.3	0.004	-	-	-	-	-	-
<b>Ag</b>	43.3	0.118	-	0.018	0.038	0.018	0.088	0.0071
<b>S</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sr</b>	111.1	0.303	-	-	-	-	-	-
<b>Sn</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ba</b>	345	0.942	-	-	-	-	-	-
<b>Ni</b>	21.3	0.058	-	0.064	0.137	0.055	0.268	-
<b>Co</b>	5.7	0.016	-	0.022	0.047	0.048	0.234	-
<b>Cr</b>	34.5	0.094	-	-	-	-	-	-
<b>Te</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Hg</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Se</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sb</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>W</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Be</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Au</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	-	10.49	-	-	-	-	8
<b>CaO</b>	-	-	1.55	-	-	-	-	1.5
<b>ZnO</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>PbO</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	-	2.78	-	-	-	-	3.4
<b>MgO</b>	-	-	0.54	-	-	-	-	0.4
<b>MnO</b>	-	-	0.51	-	-	-	-	0.15
<b>FeO</b>	-	-	3.99	-	-	-	-	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	5
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	0.1
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	-	0.19	-	-	-	-	0.4
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	0.28	-	-	-	-	-
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-	-	75.83	-	-	-	-	75
<b>CO<sub>3</sub></b>	-	-	1.05	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	5
<b>SO<sub>4</sub></b>	-	-	1.37	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>36611</b>	<b>100</b>	<b>98.58</b>	<b>46.825</b>	<b>100</b>	<b>20.531</b>	<b>100</b>	<b>98.9571</b>

\*Aplicado en lixiviados de jales para pruebas de diagnóstico de movilidad  
Fuente: elaboración propia con información de Moreno et al. (2009), Hernández et al. (2013)

**Tabla 15.** Caracterización química de la presa Dos Carlos (continuación)

<b>Dos Carlos</b>				
Elemento	Fuente: Hernández et al. (2014)		Fuente: Flores (2017)	
	ICP-AAS	XRF	AAS	XRF
	%	%	%	%
<b>Pb</b>	0.026	-	-	-
<b>Zn</b>	0.4	-	-	0.045
<b>Cu</b>	0.011	-	-	-
<b>Fe</b>	2.69	-	-	-
<b>Mg</b>	0.005	-	-	-
<b>Mn</b>	0.046	-	-	-
<b>Sc</b>	0.0004	-	-	-
<b>Cd</b>	0.017	-	-	-
<b>As</b>	0.043	-	-	-
<b>Bi</b>	0.0002	-	-	-
<b>Ag</b>	0.0056	0.0055	0.0055	0.0051
<b>S</b>	11.45	-	-	-
<b>Sr</b>	0.4632	-	-	-
<b>Sn</b>	0.0002	-	-	-
<b>Ba</b>	0.33	-	-	-
<b>Ni</b>	0.005	-	-	-
<b>Co</b>	0.008	-	-	-
<b>Cr</b>	0.037	-	-	-
<b>Te</b>	0.0051	-	-	-
<b>Hg</b>	0.0003	-	-	-
<b>Se</b>	0.0065	-	-	-
<b>Sb</b>	0.0007	-	-	-
<b>W</b>	0.0053	-	-	-
<b>Be</b>	0.0001	-	-	-
<b>Au</b>	0.00006	0.000058	0.000058	0.00006
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	7.032	7.32	7.32	6.5
<b>CaO</b>	0.2	0.69	0.69	0.69
<b>ZnO</b>	-	0.045	-	-
<b>PbO</b>	-	0.031	-	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2.28	0.08	0.08	0.08
<b>MgO</b>	-	0.54	0.54	0.548
<b>MnO</b>	-	0.73	0.73	0.731
<b>FeO</b>	-	-	-	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	2.8	2.8	2.8
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.11	0.12	0.12	0.12
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.2	0.08	2.32	0.08
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.278	0.53	0.53	-
<b>SiO<sub>2</sub></b>	70.04	70.43	70.43	73.3
<b>CO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	0.94	-	0.94
<b>SO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>95.33566</b>	<b>84.34156</b>	<b>85.56556</b>	<b>85.83916</b>

Fuente: elaboración propia con información de Hernández et al. (2014), Flores (2017)

**Tabla 16.** Caracterización química de la presa Sur I.

<b>Sur I</b>							
<b>Fuente: Moreno et al., 2009</b>							
<b>Elemento</b>	<b>ICP</b>		<b>NOM-053-ECOL-1993*</b>			<b>EPA13-12*</b>	
	Promedio (mg/kg)	%	Promedio %	Promedio (mg/L)	%	Promedio (mg/L)	%
<b>Pb</b>	1910	5.124	-	3.304	2.577	0.026	0.051
<b>Zn</b>	2540	6.814	-	43.375	33.828	16	31.686
<b>Cu</b>	139	0.373	-	0.975	0.760	0.035	0.069
<b>Fe</b>	26090	69.99	-	0.254	0.198	0.044	0.087
<b>Mn</b>	5600	15.023	-	79.375	61.905	34.07	67.471
<b>Cd</b>	13	0.035	-	0.571	0.445	0.136	0.269
<b>As</b>	40.2	0.24	-	0.001	0.001	0.001	0.002
<b>Bi</b>	0.4	0.001	-	-	-	-	-
<b>Ag</b>	89.5	0.24	-	0.036	0.028	0.009	0.018
<b>Sr</b>	161.2	0.432	-	-	-	-	-
<b>Ba</b>	509.2	1.366	-	-	-	-	-
<b>Ni</b>	60.9	0.163	-	0.156	0.122	0.075	0.149
<b>Co</b>	8.4	0.023	-	0.174	0.136	0.1	0.198
<b>Cr</b>	65.7	0.176	-	-	-	-	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	-	7.83	-	-	-	-
<b>CaO</b>	-	-	3.39	-	-	-	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	-	3.48	-	-	-	-
<b>MgO</b>	-	-	1.06	-	-	-	-
<b>MnO</b>	-	-	0.72	-	-	-	-
<b>FeO</b>	-	-	0.72	-	-	-	-
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	-	0.96	-	-	-	-
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	0.32	-	-	-	-
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-	-	55.82	-	-	-	-
<b>CO<sub>3</sub></b>	-	-	3.84	-	-	-	-
<b>SO<sub>4</sub></b>	-	-	4.79	-	-	-	-
<b>Total</b>	37276.8	100	82.93	128.221	100	50.496	100

\*Aplicado en lixiviados de jales para pruebas de diagnóstico de movilidad  
Fuente: elaboración propia con información de Moreno et al. (2009)

**Tabla 17. Caracterización química de la presa Sur II.**

<b>Sur II</b>							
<b>Fuente: Moreno et al., 2009</b>							
<b>Elemento</b>	<b>ICP</b>		<b>NOM-053-ECOL-1993*</b>		<b>EPA13-12*</b>		
	Promedio (mg/kg)	%	Promedio %	Promedio (mg/L)	%	Promedio (mg/L)	%
<b>Pb</b>	1205.5	3.184	-	29.142	20.032	0.042	0.344
<b>Zn</b>	2914.1	7.697	-	49.764	34.207	3.693	30.228
<b>Cu</b>	184.9	0.488	-	0.52	0.357	0.007	0.057
<b>Fe</b>	26348.1	69.597	-	0.568	0.39	0.037	0.303
<b>Mn</b>	6651.9	17.571	-	64.986	44.670	8.346	68.315
<b>Cd</b>	14.2	0.038	-	0.406	0.279	0.063	0.516
<b>As</b>	12	0.032	-	0.005	0.003	0	0
<b>Bi</b>	1.5	0.004	-	-	-	-	-
<b>Ag</b>	44.5	0.118	-	0.014	0.010	0.001	0.008
<b>Sr</b>	119.1	0.315	-	-	-	-	-
<b>Ba</b>	294.7	0.778	-	-	-	-	-
<b>Ni</b>	18.8	0.05	-	0.034	0.023	0.01	0.082
<b>Co</b>	6.5	0.017	-	0.04	0.027	0.018	0.147
<b>Cr</b>	42.3	0.112	-	-	-	-	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	-	7.53	-	-	-	-
<b>CaO</b>	-	-	3.29	-	-	-	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	-	3.14	-	-	-	-
<b>MgO</b>	-	-	0.88	-	-	-	-
<b>MnO</b>	+-	-	0.85	-	-	-	-
<b>FeO</b>	-	-	3.39	-	-	-	-
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	-	0.58	-	-	-	-
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	0.3	-	-	-	-
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-	-	72.38	-	-	-	-
<b>CO<sub>3</sub></b>	-	-	3.6	-	-	-	-
<b>SO<sub>4</sub></b>	-	-	1.32	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>37858.1</b>	<b>100</b>	<b>97.26</b>	<b>145.479</b>	<b>100</b>	<b>12.217</b>	<b>100</b>

\*Aplicado en lixiviados de jales para pruebas de diagnóstico de movilidad  
Fuente: elaboración propia con información de Moreno et al. (2009)

Después de esta revisión se evidencia la importancia de la minería en el estado de Hidalgo y las consecuencias legales y ambientales con transgresión a los derechos humanos y riesgos contra la salud de los habitantes. Por ese motivo es necesario profundizar y estudiar los indicadores relacionados con esta causa y proponer las medidas necesarias para mitigar los problemas ambientales de las ciudades donde la población interactúa con pasivos ambientales.

## **CAPÍTULO 3. OBJETIVOS**

### **3.1.OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un marco de Indicadores que permita evaluar la interacción del Desarrollo Urbano Sustentable y la presencia histórica de jales de la Comarca Minera de Hidalgo para proponer medidas correctivas útiles para políticas públicas.

### **3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar las actividades mineras de la Comarca Minera de Hidalgo en el periodo 2000-2020 y el cambio de uso de suelo en el área urbana en relación con los jales. Con apoyo de SIG se determinó el porcentaje de cambio de uso de suelo en los jales de la Comarca Minera.
2. Seleccionar Indicadores de Sustentabilidad que permitan orientar la toma de políticas públicas en la región de estudio. La selección dirigida de indicadores pertenecientes a los ámbitos del desarrollo sustentable más el ámbito que describe la minería y los jales permite el cálculo del Índice Urbano/Minero de Sustentabilidad.
3. Evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos utilizando los indicadores de sustentabilidad de la Comarca Minera de Hidalgo a través de la Matriz CONESA, con la finalidad de identificar los impactos ambientales más frecuentes en la etapa de desarrollo urbano post minero.
4. Identificar y analizar alternativas para un manejo sustentable de los jales, para realizar propuestas de manejo. Para ello, se empleó la metodología PRISMA con la finalidad de recabar información sobre estrategias de remediación que pudieran ser aplicables a los jales de la Comarca Minera.

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

De manera general, se llevó a cabo una investigación cuyo propósito es describir una población objetivo en un contexto inicial y como se comparará esa información con mediciones posteriores. Esto permite evaluar cambios en virtud de la implementación de un proyecto, con el objetivo de mejorar la gestión del conocimiento, así como la toma de decisiones desde un ámbito institucional.

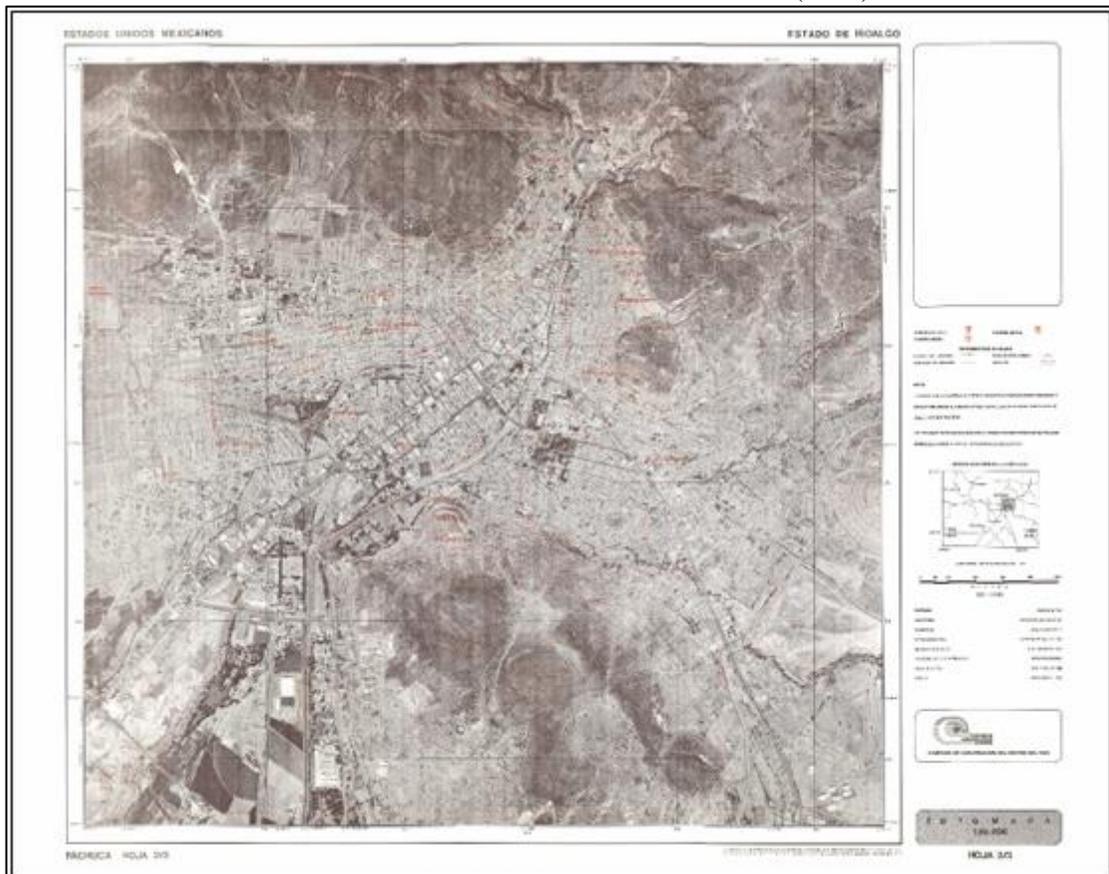
### 4.1.OBJETIVO 1

*Analizar las actividades mineras de la Comarca Minera de Hidalgo en el periodo 2000-2020 y el cambio de uso de suelo en el área urbana en relación con los jales.*

Mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se delimitaron las presas de jales ubicadas en los municipios de la Comarca Minera. Se implementaron los softwares Qgis (versión 3.24.2) y Google Earth Pro para llevar a cabo la geolocalización de las presas de jales. Se conoce que los polígonos que representan los jales mineros se ubican en los municipios de Pachuca de Soto (presa Sur I-completamente urbanizado a la fecha- y presa Sur II), Mineral de la Reforma (presa Dos Carlos) y Omitlán de Juárez (presas Omitlán o Velasco I y II) (Moreno et al., 2009).

Se tomo como línea base orto imágenes de la zona de estudio del año 1982, elaboradas por la Comisión de Conurbación del Centro del País (**Ilustraciones 11, 12 y 13**).

Comisión de Conurbación del Centro del País (1982)

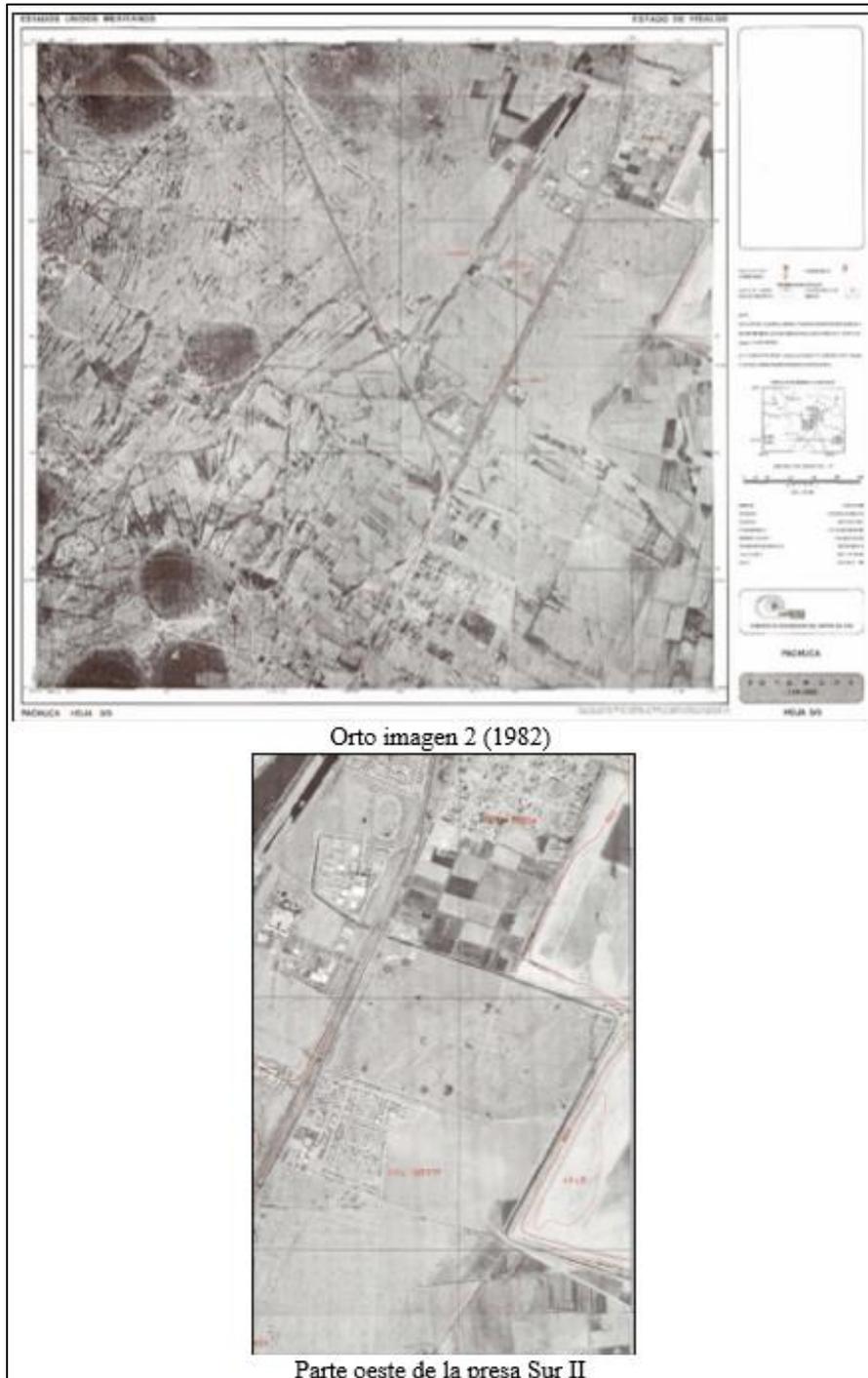


Orto imagen 1 (1982)



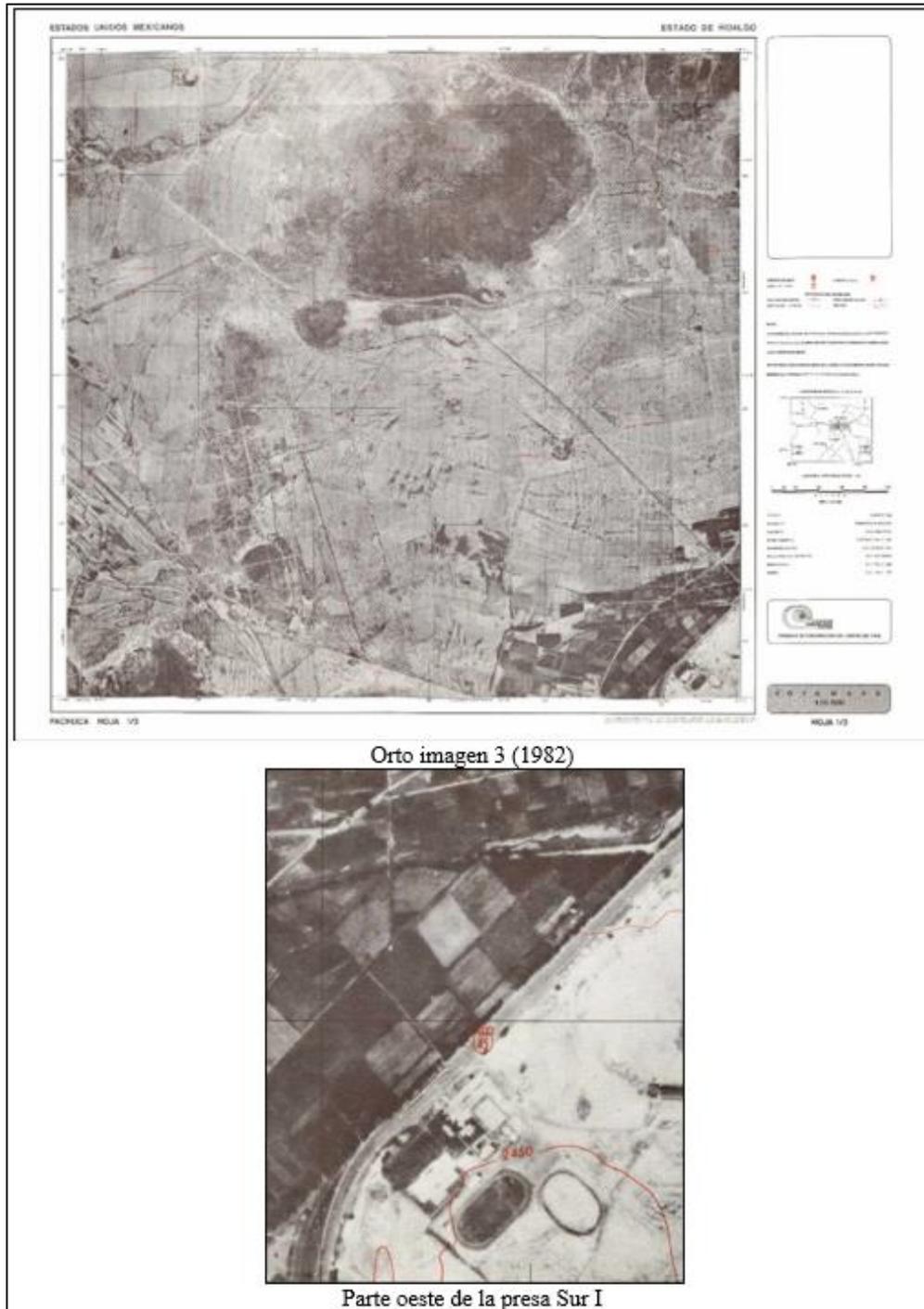
Ilustración 11. Orto imagen 1 de la zona de estudio, 1982

Comisión de Conurbación del Centro del País (1982)



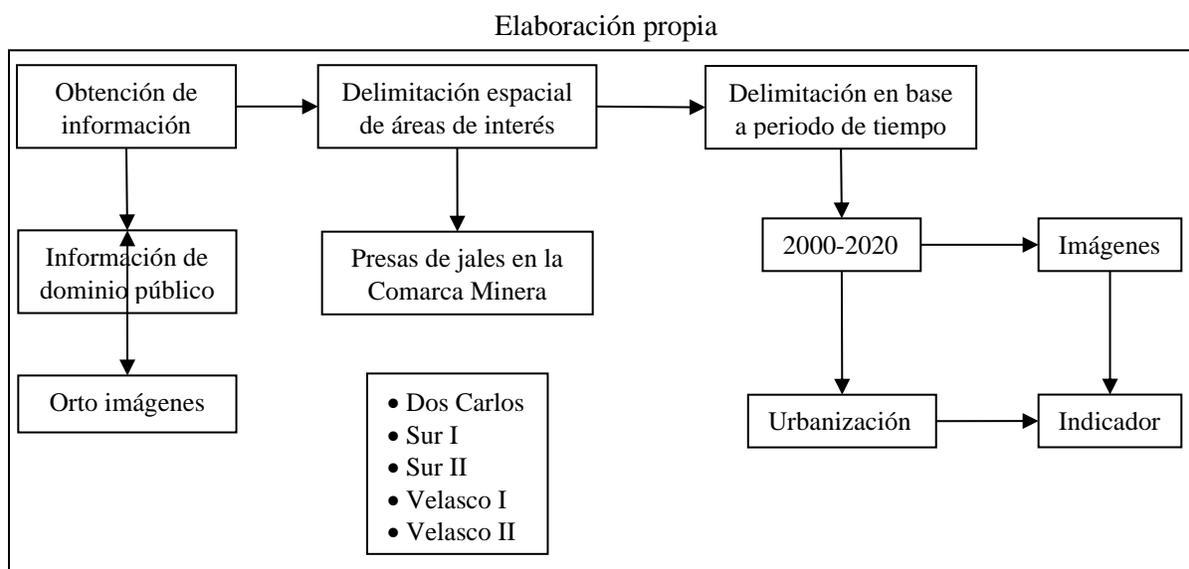
*Ilustración 12. Orto imagen 2 de la zona de estudio, 1982*

Comisión de Conurbación del Centro del País (1982)



*Ilustración 13. Orto imagen 3 de la zona de estudio*

Posteriormente los polígonos fueron marcados manualmente en Google Earth Pro y exportados a Qgis. Posteriormente, con apoyo de información georeferenciada (archivos shp y bil) de dominio público se elaboraron proyecciones que mostraran cual ha sido el grado de urbanización que han sufrido los jales mineros en el periodo 2000-2020. El procedimiento se esquematiza en la **Ilustración 14**.



*Ilustración 14. Procedimiento implementado para la obtención de información*

El progresivo cambio de uso de suelo en los jales mineros y el uso que se le dé puede interpretarse como un indicador de sustentabilidad urbana. Por ello, es indispensable determinar el grado progresivo de urbanización de estos pasivos ambientales mineros.

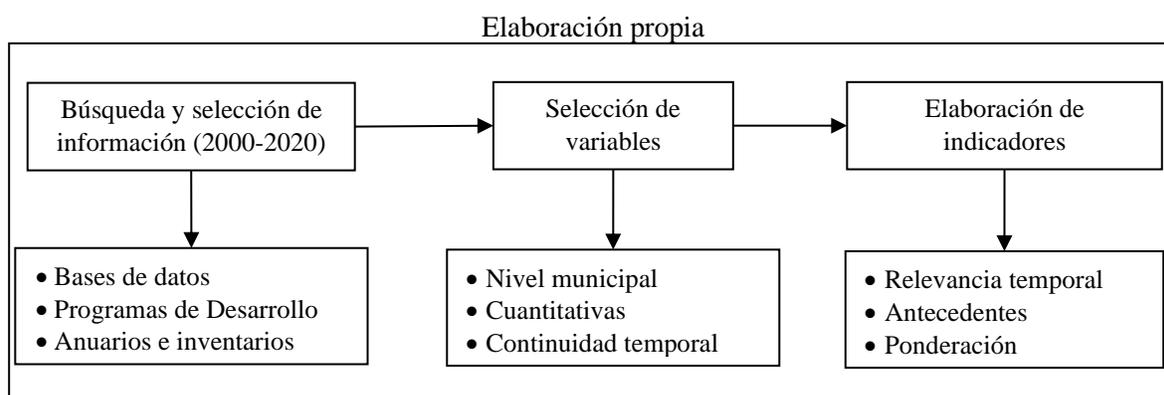
## 4.2.OBJETIVO 2

*Seleccionar Indicadores de Sustentabilidad que permitan orientar la toma de políticas públicas en la región de estudio.*

Una vez seleccionados los indicadores de los ámbitos sociodemográfico, ambiental, económico y minero-jales se llevó a cabo el siguiente proceso (**Ilustración 15**):

- i. Búsqueda y consulta de información a nivel municipal en periodo 2000-2020 en bases de datos de gobierno, herramientas de planeación, anuarios y referencias científicas. La información debía proporcionar datos cuantitativos de los municipios que conforman la Comarca Minera o permitir su desagregación a nivel municipal.

- ii. Seleccionar las variables que preferentemente mantuvieran continuidad temporal.
- iii. Elaborar y calcular los indicadores. Los indicadores se clasificaron en valores positivo (+) y negativo (-), según su impacto. El valor negativo se agrega al porcentaje de crecimiento (%cre) del indicador.
- iv. Se calculo el Índice de Sustentabilidad (IS), que consiste en el promedio en base al porcentaje de información del indicador (%inf) y el %cre de cada indicador. En caso de no existir cambios en el porcentaje se toma en consideración el valor más alto como %cre.
- v. Posteriormente se calcula un IS por ámbito (IS') y el total o global (IS'') para clasificar su nivel de sustentabilidad (**Tabla 18**).



*Ilustración 15. Procedimiento implementado para selección de indicadores*

*Tabla 18. Termómetro del Índice de Sustentabilidad*

Escala	Clasificación
<20	Muy baja sostenibilidad
30-40	Baja sostenibilidad
50-60	Sostenibilidad moderada
70-80	Sostenibilidad alta
90-100≥	Sostenibilidad muy alta

Fuente: Medina (2020)

#### 4.2.1. CÁLCULO DE INDICADORES

De acuerdo a sus características, los indicadores seleccionados se clasificaron en sociodemográficos, ambientales, económicos y minero-jales. El cálculo de dichos indicadores se presenta a continuación.

#### 4.2.1.1.INDICADORES SOCIODEMOGRÁFICOS

Estos indicadores se basan en el acceso a barrios por medio del incremento de viviendas, enriquecimiento de calidad de espacios libres y mejora nivel de saneamiento y salud (Mohamed et al., 2019). Pueden abarcar aspectos como educación, salud, equidad, seguridad y el entorno donde las personas viven y socializan (Momoh et al., 2021).

##### 4.2.1.1.1. POBLACIÓN TOTAL (S1)

La Población Total (PT) se elaboró con información del Banco de Indicadores del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI-BI) en cada quinquenio del periodo, la información ausente se complementó con el cálculo de la Tasa de Crecimiento (TC)  
**Ecuación 1.**

*Ecuación 1. Tasa de crecimiento*

$TC = \left[ \left( \frac{\text{Población final}}{\text{Población inicial}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] * 100 = (\%)$
Fuente: INEGI (2017)

##### 4.2.1.1.2. DENSIDAD POBLACIONAL (S2)

La Densidad de Población (DP) se elaboró con información INEGI-BI, tomando la PT y el área de la superficie de los municipios, que fue consultada en el SIG.

*Ecuación 2. Densidad de población.*

$DP = \frac{PT}{\text{Superficie municipal}} = (\text{Habitantes}/\text{Km}^2)$
---

##### 4.2.1.1.3. COBERTURA DE SERVICIOS DE SALUD (S3)

La Cobertura de Servicios de Salud (CSS) emplea la PT y su cobertura de derechohabencia, tanto por número de individuos como su porcentaje (**Ecuación 3**) del INEGI-BI. La información faltante fue complementada con la ecuación de TC.

*Ecuación 3. Cobertura de Servicios de Salud.*

$CSS = \frac{\text{Derechohabientes} * 100}{PT} = (\%)$
---

#### 4.2.1.1.4. ÍNDICE DE SERVICIOS URBANOS (S4)

Para el cálculo del ISU inicialmente se requiere el “Total de viviendas particulares habitadas” para calcular las Viviendas con servicios de agua (VA) (usando los indicadores “Viviendas particulares habitadas que disponen de agua de la red pública en el ámbito de la vivienda” y “Porcentaje de viviendas con agua entubada dentro de la casa” para 2020), las Viviendas con drenaje (VD) (“Viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje”, “Porcentaje de viviendas con drenaje” y “Porcentaje de viviendas particulares habitadas con disponibilidad de drenaje”) y las Viviendas con energía eléctrica (VE) (“Viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica” y “Porcentaje de viviendas con electricidad”) de INEGI-BI (**Ecuación 4**).

*Ecuación 4. Índice de Servicios Urbanos*

$ISU = \sqrt[3]{VA * VD * VE} = (\%)$ $0 \leq ISU \leq 100$
Fuente: Piña (2014), Ceballos & Piña (2017), Medina (2019), Medina (2020)

#### 4.2.1.1.5. ÍNDICE DE VIVIENDAS SUSTENTABLES (S5)

El Índice de Viviendas Sustentables (IVS) abarca los indicadores “Porcentaje de viviendas que disponen de panel solar para tener electricidad” como Viviendas con panel solar (VP), “Porcentaje de viviendas que disponen de calentador solar de agua” como Viviendas con calentador solar de agua (VC), “Porcentaje de viviendas donde separan en orgánico e inorgánico los residuos” como Viviendas que separan residuos (VR) y “Porcentaje de viviendas donde todos sus focos son ahorradores” como Viviendas con focos ahorradores (VF), de INEGI-BI (**Ecuación 5**).

*Ecuación 5. Índice de Viviendas Sustentables*

$IVS = \sqrt[4]{VP * VC * VR * VF} = (\%)$ $0 \leq \text{Indice de Viviendas Sustentables} \leq 100$
Fuente: Piña (2014), Ceballos & Piña (2017), Medina (2019), Medina (2020)

#### 4.2.1.1.6. COBERTURA DE EDUCACIÓN EN POBLACIÓN DE 3 A 24 AÑOS (S6)

Consiste en calcular el Porcentaje de población de 3 a 24 años que asiste a la escuela (PPE.3-24) de los indicadores “Porcentaje de la población de 3 a 5 años que asiste a la escuela”

(PPE.3-5), “Porcentaje de la población de 6 a 11 años que asiste a la escuela” (PPE.6-11), “Porcentaje de la población de 12 a 14 años que asiste a la escuela” (PPE.12-14), “Porcentaje de la población de 15 a 24 años que asiste a la escuela” (PPE.15-24) de INEGI-BI (**Ecuación 6**).

*Ecuación 6. Porcentaje población de 3 a 24 años con educación.*

$$PPE.3 - 24 = \frac{(PPE.3 - 5) + (PPE.6 - 11) + (PPE.12 - 14) + (PPE.15 - 24)}{4} = (\%)$$

#### **4.2.1.2.INDICADORES AMBIENTALES**

Se caracterizan por tomar en consideración los factores, prácticas o cualidades que se valoran en el entorno físico; los paisajes naturales, los efectos nocivos de energía, transporte, la calidad del agua y del aire y mejorar la gestión y reciclaje de desechos (Allen, 2009, Momoh et al., 2021).

##### **4.2.1.2.1. SUPERFICIE DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS (A1)**

Se basa en el porcentaje de ANP que abarca la superficie municipal (**Ecuación 7**).

*Ecuación 7. Áreas Naturales Protegidas.*

$$ANP = \frac{\text{Superficie de ANP} * 100}{\text{Superficie municipal}} = (\%)$$

##### **4.2.1.2.2. DÉFICIT DE ÁREAS VERDES (A2)**

Es un indicador propuesto por la OMS, se refiere a que la Superficie ideal de áreas verdes (SIAV) en un espacio urbano debe ser al menos 9m<sup>2</sup> por habitante, con la finalidad de garantizar los servicios ecosistémicos que estas proveen. Con el indicador “Población total” de INEGI-BI y la superficie de áreas verdes es posible calcular el Déficit de áreas verdes (DAV) (**Ecuación 8**).

*Ecuación 8. Cálculo del Déficit de Áreas Verdes*

$$DAV = SIAV - \left( \frac{9m^2 * PT}{10,000} \right) = (Ha)$$

Fuente: OMS (2016)

#### 4.2.1.2.3. SUPERFICIE FORESTAL (A3)

Es el porcentaje de la superficie municipal considerado como Superficie forestal (SF) (**Ecuación 9**).

*Ecuación 9. Superficie forestal.*

$$SF = \frac{\text{Superficie forestal} * 100}{\text{Superficie municipal}} = (\%)$$

#### 4.2.1.2.4. SEGUIMIENTO DE COA REGISTRADAS (A4)

La Cédula de Operación Anual (COA) es un documento que ciertas empresas deben presentar anualmente ante gobierno con la finalidad de registrar sus emisiones en el RETC. El Seguimiento de estos trámites registrados (SCR) consiste en calcular el porcentaje de las COA's registradas en el año en curso en el RETC en relación con el Total (TCOA) que se han registrado con anterioridad para calcular como se ha desarrollado el cumplimiento de dicho trámite (**Ecuación 10**).

*Ecuación 10. Seguimiento de COA's registradas.*

$$SCR = \frac{COA * 100}{TCOA} = (\%)$$

#### 4.2.1.2.5. DERECHO AL AGUA (VOLUMEN) (A5)

La OMS, considera que una persona requiere diariamente al menos 50 litros de agua para consumo y uso doméstico (considerando un acceso intermedio y una preocupación media por la salud (Howard et al., 2020). Por ello se toma a consideración el indicador "Población total" de INEGI-BI y el Volumen de agua domestica concesionada (VADC) que muestra el RPDA (CONAGUA , 2022) y determinar así el porcentaje de cumplimiento del Derecho al agua (en volumen) (DAvol) (**Ecuación 11**).

*Ecuación 11. Derecho al agua (volumen).*

$$DAvol = \frac{VADC * 100}{\left(\frac{PT * 50}{1,000}\right) * 365} = (\%)$$

#### 4.2.1.2.6. DERECHO AL AGUA (PRECIO) (A6)

Considera la Tarifa de agua más alta (TA). De acuerdo con la ONU, el precio del agua no debe exceder el 3% del ingreso del hogar (ONU-Agua, 2014), lo cual puede interpretarse como el salario mínimo, mismo que fue considerado en base a su promedio anual (CONASAMI, 2021) y multiplicado por 12, para garantizar el Derecho al agua en base a su precio (DAp) (**Ecuación 12**).

*Ecuación 12. Derecho al agua (precio).*

$$DAp = \frac{TA * 100}{3\% \text{ del salario mínimo mensual} * 12} = (\%)$$

#### 4.2.1.2.7. EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> (A7)

Este indicador considera la flota total de vehículos por municipio (FV), basándose en el indicador “Vehículos de motor registrados en circulación” de INEGI-BI y la Constante de Emisión (CE) de un trayecto típico (373.9762963gr) (IMIP, 2020) (**Ecuación 13**).

*Ecuación 13. Emisión de CO<sub>2</sub>.*

$$Emisión CO_2 = \frac{FV * CE}{1,000,000} = (Ton)$$

#### 4.2.1.2.8. GENERACIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS (A8)

Considera los indicadores “Población total” y “Cantidad promedio diaria de residuos recolectados” (CPDR) de INEGI-BI e INEGI (2019) para calcular la Generación per cápita de residuos (GPCR) (**Ecuación 14**).

*Ecuación 14. Generación Per Cápita de Residuos.*

$$GPCR = \left( \frac{CPDR}{Población total} \right) * 365 = (Kg)$$

#### 4.2.1.3. INDICADORES ECONÓMICOS

La sustentabilidad económica se basa en la capacidad de una economía para sostener un nivel definido de producción por un tiempo indefinido (McKenzie, 2004). Algunos aspectos que abarca son: oportunidades laborales, crecimiento económico sostenible, expansión urbana, planes de vivienda asequibles, entre otros (Mohamed et al., 2019, Momoh et al., 2021).

#### 4.2.1.3.1. VALOR AGREGADO BRUTO (E1)

Se emplea el Valor agregado bruto (VAB) en millones de pesos (MP) como una forma de calcular el PIB desde una perspectiva regional (INEGI, 2006). El Valor agregado de producción (VBP) se relacionó directamente con la producción bruta total del municipio y el CI<sup>13</sup> (**Ecuación 15**).

*Ecuación 15. Valor Agregado Bruto.*

$$VAB = VBP - CI = (MP)$$

Fuente: INEGI (2006)

#### 4.2.1.3.2. UNIDADES ECONÓMICAS (E2)

Se cálculo del incremento de las Unidades Económicas (UES) con los indicadores “Unidades económicas. Sector privado y paraestatal” de INEGI-BI y la clave “UE” de Descarga Masiva de Datos-Hidalgo del INEGI.

#### 4.2.1.3.3. UTILIDAD (E3)

Consiste en calcular la diferencia entre el Ingreso (I) (“Total de ingresos por suministro de bienes y servicios. Sector privado y paraestatal” de INEGI-BI e “ingreso por suministro de bienes y servicios” de Descarga Masiva de Datos-Hidalgo en INEGI) y el indicador “Egresos brutos de los municipios” para el Egreso (E). (**Ecuación 16**).

*Ecuación 16. Utilidad.*

$$U = I - E = (MP)$$

#### 4.2.1.3.4. TASA DE DESEMPLEO (E4)

La TD se calculó con información de INEGI-BI, “Porcentaje de población de 12 años y más económicamente activa” (PEA) y el inverso de “Porcentaje de la población de 12 años y más económicamente activa ocupada” como PEAD (**Ecuación 17**).

---

<sup>13</sup> Obtenido del archivo de descarga masiva de indicadores:  
<https://www.inegi.org.mx/app/descarga/default.html#>

*Ecuación 17. Tasa de Desempleo*

$TD = \left( \frac{PEAD}{PEA} \right) * 100 = (\%)$
Fuente: INEGI (2017)

#### **4.2.1.4. INDICADORES MINEROS-JALES**

Diversos estudios de sustentabilidad en minería se han basado en la implementación de indicadores mineros. Sin embargo, la información se ha basado en su productividad (explotación de minerales), consumo de recursos (agua y energía) y beneficios socioeconómicos (salarios, empleos, cantidad de mineras), por ello la presente investigación tomará en consideración información sobre la minería local y los jales en el periodo de interés.

##### **4.2.1.4.1. ÁREA CONCESIONADA (M1)**

Implementando los SIG y con apoyo del **CartoMinMex**<sup>14</sup>, se realizó el cálculo de cuanta área municipal ha sido concesionada durante el periodo 2000-2020 en cada municipio de la Comarca Minera.

##### **4.2.1.4.2. ÁREA DE JALES URBANIZADA (M2)**

Mediante el uso de SIG y referencias científicas, se obtuvo el área que ha sido progresivamente urbanizada en los jales mineros.

##### **4.2.1.4.3. UNIDADES ECONÓMICAS MINERAS (M3)**

Consiste en calcular el incremento de UES del sector minero en los municipios de la Comarca Minera según INEGI-BI y la Descarga Masiva.

##### **4.2.1.4.4. EMPLEABILIDAD MINERA (M4)**

Considera la cantidad de personas que emplea la industria minera según INEGI-BI y la Descarga Masiva.

---

14

<https://portalags1.economia.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=1f22ba130b0e40d888bfc3b7fb5d3b1b>

#### 4.2.1.4.5. UTILIDAD MINERA (M5)

Se basa en la diferencia entre los ingresos y gastos del sector minero por municipio. La información se obtuvo del INEGI-BI y el archivo de la Descarga Masiva.

### 4.3.OBJETIVO 3

*Evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos de la actividad minera de la Comarca Minera de Hidalgo a través de la Matriz CONESA.*

En base al conjunto de indicadores de sustentabilidad seleccionados, se llevó a cabo una metodología de evaluación de impacto ambiental, misma que requiere cumplir con una serie de fases con la finalidad de identificar, predecir, interpretar, prevenir, valorar y comunicar los impactos que se manifiestan. Dichos impactos se manifiestan más allá del ámbito ambiental, abarcando así temas relevantes para el desarrollo sustentable. Debido a la especificidad del análisis del impacto ambiental y a determinadas dificultades (**Tabla 19**), es importante señalar que la mayoría de las metodologías existentes no se encuentran completamente desarrolladas, lo cual imposibilita el desarrollo de una metodología general y precisa (Cotán-Pinto, 2007).

*Tabla 19. Dificultades para la consecución de una metodología standard para la Evaluación de Impacto Ambiental*

<b>Dificultades para elaboración de metodologías</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Factores propios generan cambios en la metodología.</li><li>• Metodología debe ser acorde a la actividad a evaluar.</li><li>• Diversidad de métodos para estudiar el impacto sobre un mismo factor.</li><li>• Variación de los vectores de una actividad a otra.</li></ul>
Fuente: Cotán-Pinto (2007)

La Matriz Conesa, o Metodología Conesa es un método de valoración de Impacto Ambiental. El efecto ambiental abarcaría la totalidad de los cambios o consecuencias generados durante la interacción del crecimiento urbano de ciertos municipios de la Comarca Minera y sus jales mineros. La importancia del impacto ambiental sobre un factor ambiental es la base para medir el grado de manifestación cualitativa del efecto. No debe confundirse la importancia del impacto con la importancia del factor ambiental afectado (Conesa, 2000).

Una vez establecido el conjunto de Indicadores de Sustentabilidad que influyen en el nexo Desarrollo Urbano Sustentable-Jales Mineros, se procedió a la identificación de los impactos ambientales y al cálculo de su respectiva importancia (**Ecuación 18**).

*Ecuación 18. Cálculo de la importancia de los impactos ambientales*

$I = \pm(3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$
Fuente: Conesa (2000)

Las variables cualitativas para la valoración se definen de la siguiente manera:

- **Naturaleza** ( $\pm$ ). Se refiere a que la naturaleza del impacto puede ser positiva o negativa. Si un impacto es clasificado como positivo se considera nulo.
- **Intensidad** (IN) o Grado de destrucción. Se refiere a que grado es afectado el factor por la incidencia.
- **Extensión** (EX) o Área de influencia. Se refiere al área de influencia que en teoría podría ser impactada.
- **Momento** (MO) o Plazo de manifestación. Se refiere al lapso que entre la acción y el efecto sobre el factor.
- **Persistencia** (PE) o Permanencia del efecto. Es el tiempo que permanece el efecto desde su aparición y, a partir del cual el factor que fue afectado retornaría a las condiciones iniciales ya sea por medio naturales, o por la aplicación de medidas correctivas.
- **Reversibilidad** (RV). Es la posibilidad de regresar al estado inicial previo a la acción.
- **Sinergia** (SI) o Regularidad de la manifestación. Es cuando hay un reforzamiento entre dos o más efectos simples. Cuando se presenta debilitamiento por sinergismo, la valoración tendrá valores negativos.
- **Acumulación** (AC) o Incremento progresivo. Es cuando la manifestación tiene un incremento progresivo y persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.
- **Efecto** (EF) o Relación causa-efecto. Se refiere a la relación causa-efecto o como se manifiesta un efecto sobre un factor como consecuencia de una acción.
- **Periodicidad** (PR) o Regularidad de la manifestación. Se refiere a la regularidad de la manifestación del efecto, puede ser cíclico, recurrente, impredecible o constante en el tiempo.

- **Recuperabilidad (MC)** o reconstrucción por medio humanos. Es la posibilidad de poder reconstruir total o parcialmente el factor afectado.

La valoración de las variables se muestra en la **Tabla 20**.

*Tabla 20. Matriz Importancia Valoración*

Atributo	Valoración	
Naturaleza	Impacto beneficioso	+
	Impacto perjudicial	-
IN	Baja	1
	Media	2
	Alta	4
	Muy alta	8
	Total	12
EX	Puntual	1
	Parcial	2
	Extenso	4
	Total	8
	Crítico	(+4)
MO	Largo plazo (más de 5 años)	1
	Medio plazo (de 1 a 5 años)	2
	Corto plazo (menos de un año)	3
	Inmediato (tiempo transcurrido nulo)	4
	Crítico	(+4)
PE	Fugaz (si dura menos de 1 año)	1
	Momentáneo	1
	Temporal (si dura entre 1 y 10 años)	2
	Pertinaz o persistente	3
	Permanente (duración superior a 10 años)	4
RV	Corto plazo	1
	Medio plazo	2
	Largo plazo	3
	Irreversible	4
SI	Sin sinergismo	1
	Sinérgico	2
	Muy sinérgico	4
AC	Simple o ausencia de efecto acumulativo	1
	Efecto acumulativo	4
EF	Indirecto (su manifestación no es consecuencia directa de la acción)	1
	Directo (consecuencia directa de la acción)	4
PR	Aparición irregular y discontinua	1
	Efecto periódico	2
	Efecto continuo	4
MC	Recuperación inmediata	1
	Recuperable a corto plazo	2
	Recuperable a medio plazo	3
	Recuperable a largo plazo	4
	Mitigable, sustituible, compensable	4
	Irrecuperable	8

Fuente: Conesa (2000)

La determinación del valor final de los impactos ambientales se determina en los rangos de la **Tabla 21**.

*Tabla 21. Valoración de la matriz de importancia*

RANGOS	EFECTO	COLOR
0≤25	compatible	verde
26≤50	moderado	amarillo
51≤75	severo	naranja
76≤100	crítico	rojo

Fuente: Conesa (2000)

Habitualmente los impactos toman valores de importancia de 13 a 100. Los impactos con una importancia menor a 25 se consideran como irrelevantes o compatibles con el medio. Son moderados si el impacto presenta una importancia mayor de 25 hasta 50. Se considera severo cuando la importancia se encuentra entre 50 y 75. Y críticos cuando la importancia sea mayor de 75 (Conesa, 2000).

Una vez determinada la importancia del impacto ambiental se lleva a cabo una ponderación de importancia relativa, dicha ponderación se expresa en Unidades de importancia (UIP) y se emplea para las ponderaciones en las estimaciones globales de los impactos y el valor asignado a cada factor resulta de la distribución relativa de 1000 unidades asignadas al total de factores ambientales. Inicialmente las mil unidades se dividen en dos ramas: medio físico (600) y medio socioeconómico y cultural (400); en el siguiente nivel, la cifra se reparte entre en el número de ramas correspondiente y así sucesivamente (**Tabla 22**). Es permisible que la valoración varíe (Conesa, 2000).

La metodología original requirió modificarse con el objeto de tomar en consideración el tiempo presente como una etapa de un proyecto, por lo que se excluye la preparación del sitio, la construcción, el tiempo de operación y el abandono, trabajando únicamente con la etapa “desarrollo urbano sustentable post-minero”, mismo que tiene el objetivo de deducir en como la presencia histórica de los jales mineros en municipios de la Comarca Minera ha influido en el desarrollo urbano sustentable. A diferencia de otras metodologías de evaluación de impacto ambiental, no es necesario someter los impactos a un sistema de Presión-Estado-Respuesta, definir un punto crítico o una medida de mitigación. Sin embargo, al igual que

los marcos de indicadores, siempre queda la duda sobre si se están contemplando todos los impactos involucrados.

*Tabla 22. Componentes ambientales*

<b>SISTEMA</b>	<b>SUBSISTEMA</b>	<b>COMPONENTE AMBIENTAL</b>	<b>UIP</b>
MEDIO FÍSICO	M. INERTE	Aire	100
		Tierra y suelo	100
		Agua	100
		<b>TOTAL M. INERTE</b>	<b>300</b>
	M. BIÓTICO	Flora	100
		Fauna	100
		<b>TOTAL M. BIÓTICO</b>	<b>200</b>
M. PERCEPTUAL	Unidades de paisaje	100	
<b>TOTAL MEDIO FÍSICO</b>			<b>600</b>
MEDIO SOCIO-ECONÓMICO	M. SOCIO CULTURAL	Usos del territorio	75
		Cultural	50
		Infraestructuras	50
		Humanos y Estéticos	100
		<b>TOTAL M. SOCIO CULTURAL</b>	<b>275</b>
	M. ECONÓMICO	Economía	50
Población		75	
<b>TOTAL M. ECONÓMICO</b>		<b>125</b>	
<b>TOTAL MEDIO SOCIO-ECONÓMICO</b>			<b>400</b>
<b>TOTAL MEDIO AMBIENTE</b>			<b>1,000</b>
Fuente: Conesa (2000), p.82			

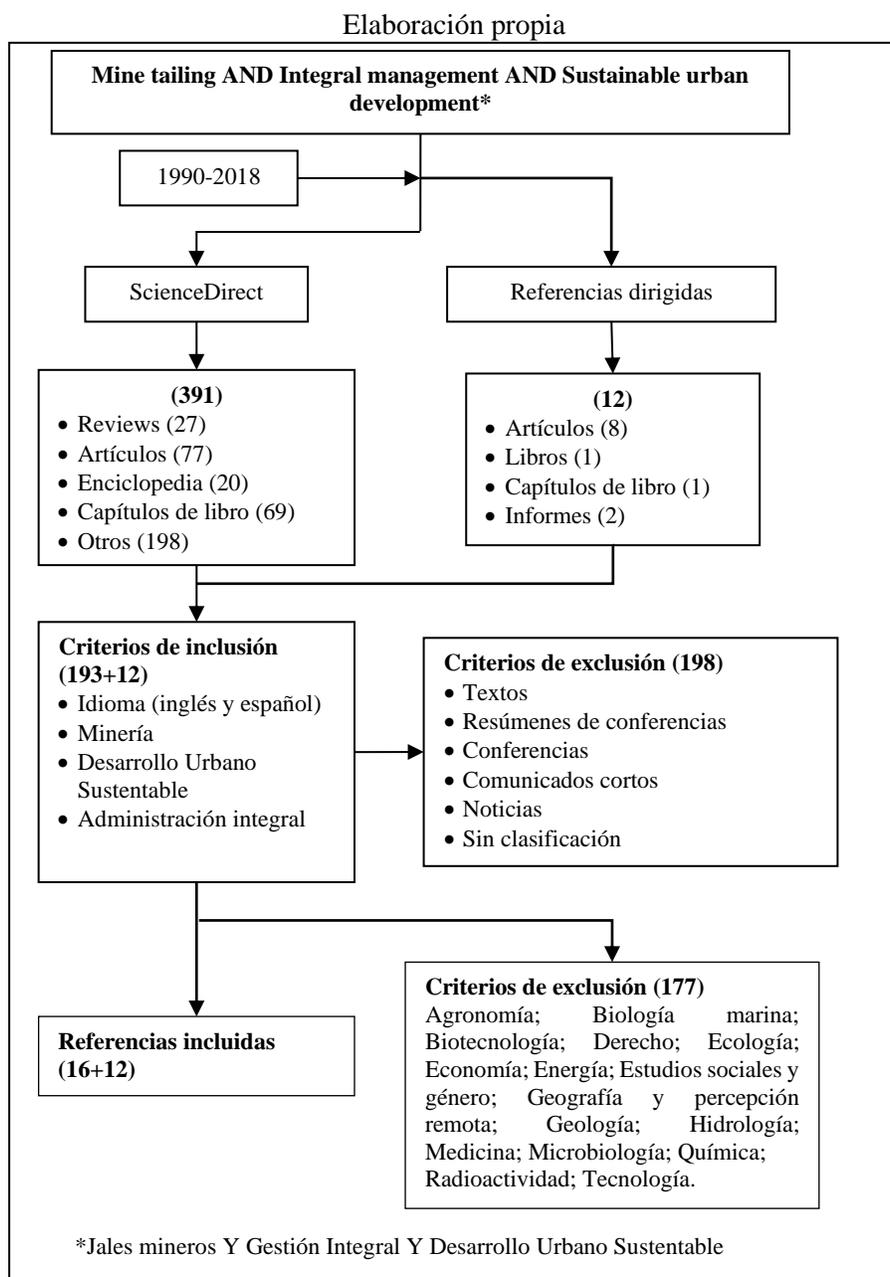
#### **4.4.OBJETIVO 4**

*Identificar y analizar alternativas para un manejo sustentable de los jales.*

Para el cumplimiento de este objetivo se requirió de una revisión sistemática de información, por lo que se implementó la metodología PRISMA (Urrutia and Bonfill, 2010), que consiste en la aplicación de criterios de inclusión y exclusión dentro de una búsqueda de información científica.

Mediante una búsqueda de información en el buscador ScienceDirect, usando el criterio de búsqueda: Mine tailing AND Integral Management AND Sustainable Urban Development (Jales mineros Y Gestión Integral Y Desarrollo Urbano Sustentable) se obtuvieron 391 referencias en el periodo 1990-2018, más 12 referencias previas obtenidas (denominadas referencias dirigidas), obteniendo así una base de datos de 403 referencias. Posteriormente se aplicaron los criterios tanto de inclusión como de exclusión para posteriormente dejar las

referencias que fueron incluidas en los resultados (**Anexo B**). El procedimiento implementado se muestra en la **Ilustración 16**.



*Ilustración 16. Procedimiento seguido para la revisión sistemática de información*

**Exclusión.** Inicialmente se basó en la clasificación de la información: textos, resúmenes de conferencias, comunicados cortos, noticias. Posteriormente se excluyeron referencias que trataran sobre otros temas.

**Inclusión.** Se incluyeron textos en inglés y español que estuvieron relacionados directamente con el criterio de búsqueda. Después de aplicar los criterios de exclusión se obtuvieron 28 referencias.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. ANALIZAR LAS ACTIVIDADES MINERAS EN EL PERIODO 2000-2020

Mediante la implementación de SIG se obtuvieron proyecciones (fotografías, mapas y polígonos justificados en orto imágenes) que muestran el cambio de uso de suelo en torno a los jales de la Comarca Minera.

#### 5.1.1. SUR I

Debido al incremento de la población de Pachuca desde los 70's, la urbanización se amplía hacia el sur del municipio como una forma de satisfacer la demanda de viviendas. Este proceso se manifestó mediante la construcción de fraccionamientos y mobiliario urbano en la periferia de los jales (teniendo la presa Sur I una superficie inicial aproximada de 168 Ha), siendo el Centro Minero Nacional la primera construcción sobre los jales junto con el fraccionamiento Unidad Minera en el 88. Posterior a la construcción del estadio Hidalgo en el 94, se visualizó la decadencia minera y la ahora ubicación favorable de los jales (Contreras & López, 2015).

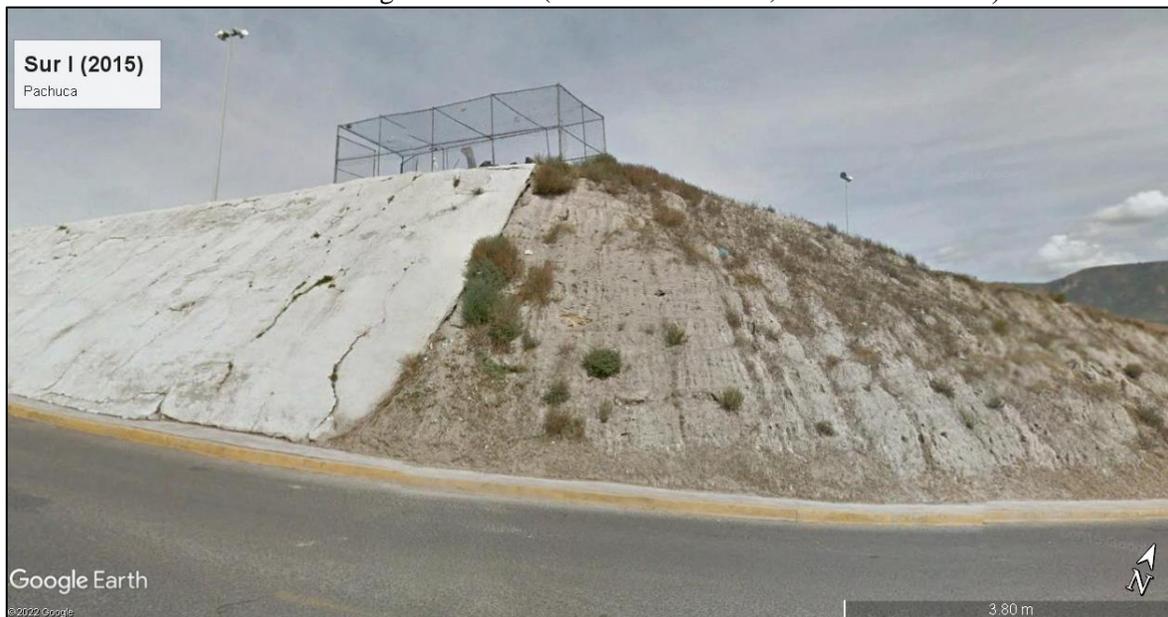
La presa Sur I es la que más cambios ha sufrido al grado de ser cubierta en su totalidad por la mancha urbana. Este proceso se ha llevado a cabo desde la década de los 80's. Sin embargo, aún prevalecen áreas donde el talud está expuesto a los fenómenos de transporte, incluso con acceso peatonal, principalmente en los alrededores del Estadio Hidalgo (**Ilustración 17 y 18**).

De acuerdo con el estudio realizado por Contreras & López (2015), sobre el desarrollo de vegetación sobre jales mineros, el proceso de urbanización de la presa Sur I comenzó en el año 1988 hasta el año 2005. Con base a dicha referencia y a la información geoespacial disponible se realizaron las siguientes proyecciones:

En base a la visualización de la orto imagen del año 1995 se observa que el lado oeste de la presa ya ha sido urbanizado por inmobiliario urbano; un Tecnológico de Monterrey, el Servicio Geológico Mexicano y tiendas departamentales en lo que hoy se conoce como la Plaza del Valle (**Ilustración 19**). En el año 2000 se procedió a la construcción de los fraccionamientos privados La Moraleja y la Herradura (**Ilustración 20**). En 2005 se concluyó

la urbanización de la presa Sur I mediante la construcción del gimnasio Fitness Sport frente al estadio Hidalgo; una escuela de educación básica y parte de un centro de rehabilitación infantil (**Ilustración 21**).

Obtenido de Google Earth Pro (-98° 45' 18.63'' N; 20° 06' 16.71'' O)



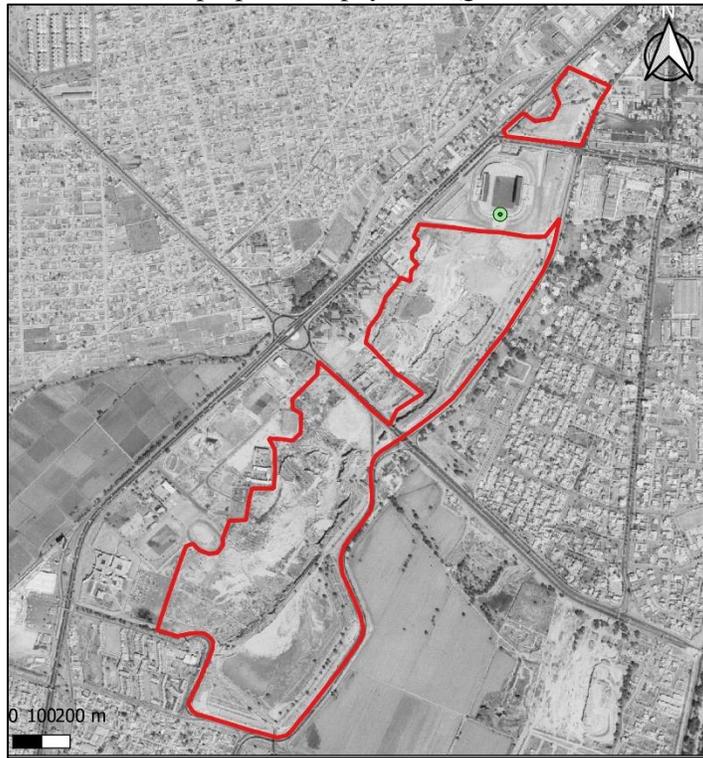
*Ilustración 17. Exposición del talud de la presa Sur I*

Obtenido de Google Earth Pro (-98°45'16.55'' N; 20°06'19.63'' O)



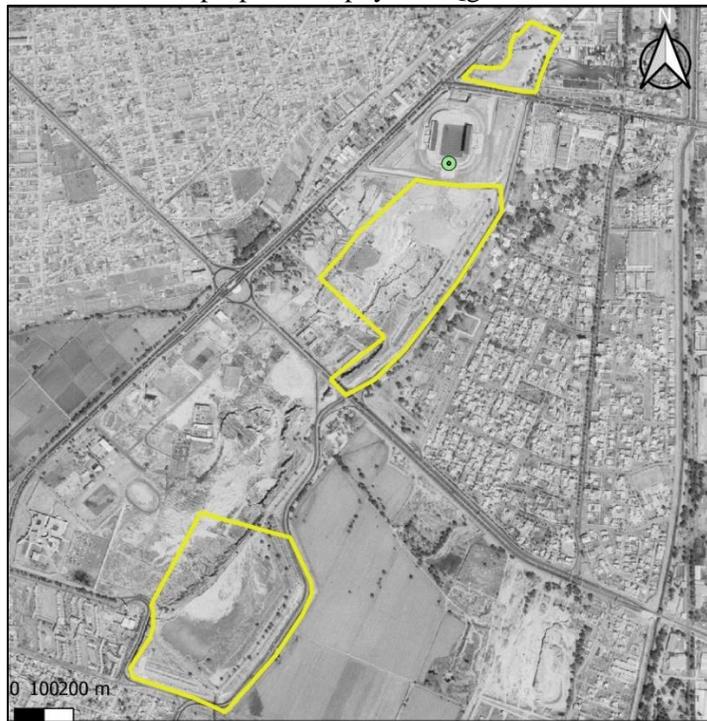
*Ilustración 18. Exposición del talud de la presa Sur I*

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



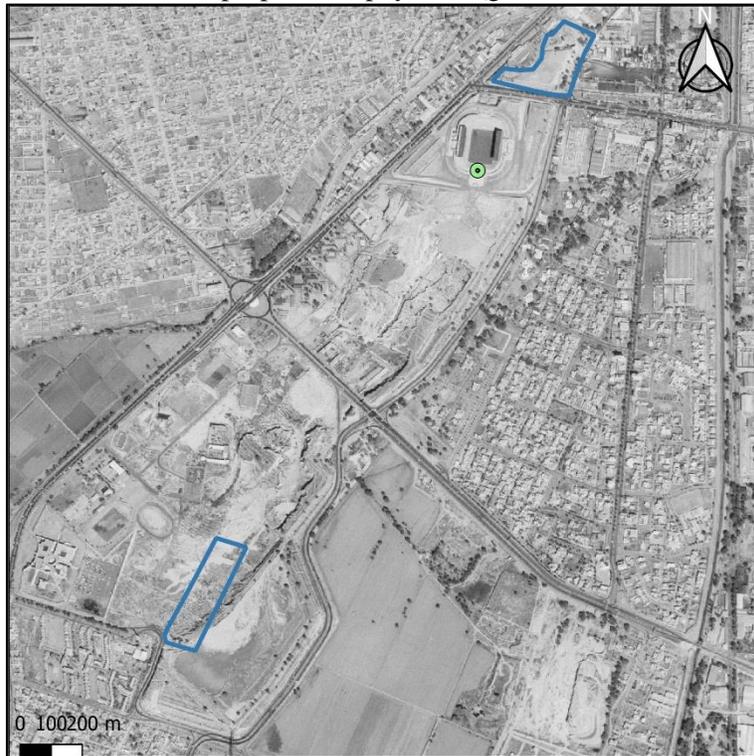
*Ilustración 19. Presa Sur I (1995)*

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



*Ilustración 20. Presa Sur I (2000)*

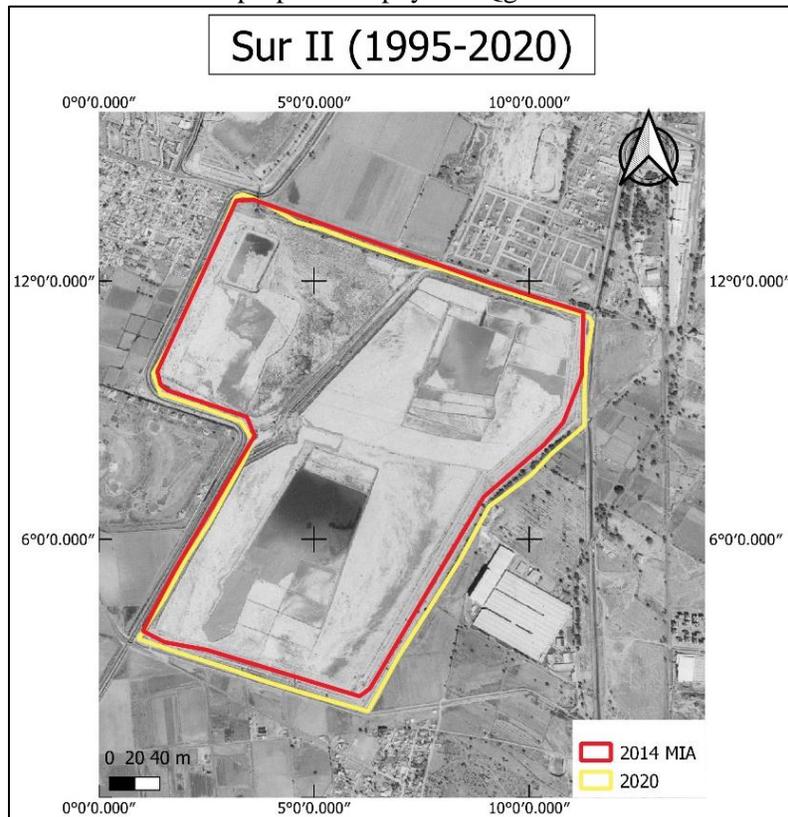
Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



*Ilustración 21. Presa Sur I (2005)*

### **5.1.2.SUR II**

La presa Sur II, no presenta a la fecha modificaciones importantes en su polígono. De acuerdo con Contreras & López (2015) se contempla la construcción del fraccionamiento “El Fénix” desde 2013. También forma parte de la MIA de Modalidad Particular que contempla su reubicación a Epazoyucan. A su alrededor se han asentado domicilios en la parte noroeste de la presa y una escuela particular de nivel básico en la parte noreste, empresas en la parte sureste y un campo de golf al sureste (**Ilustración 22**).



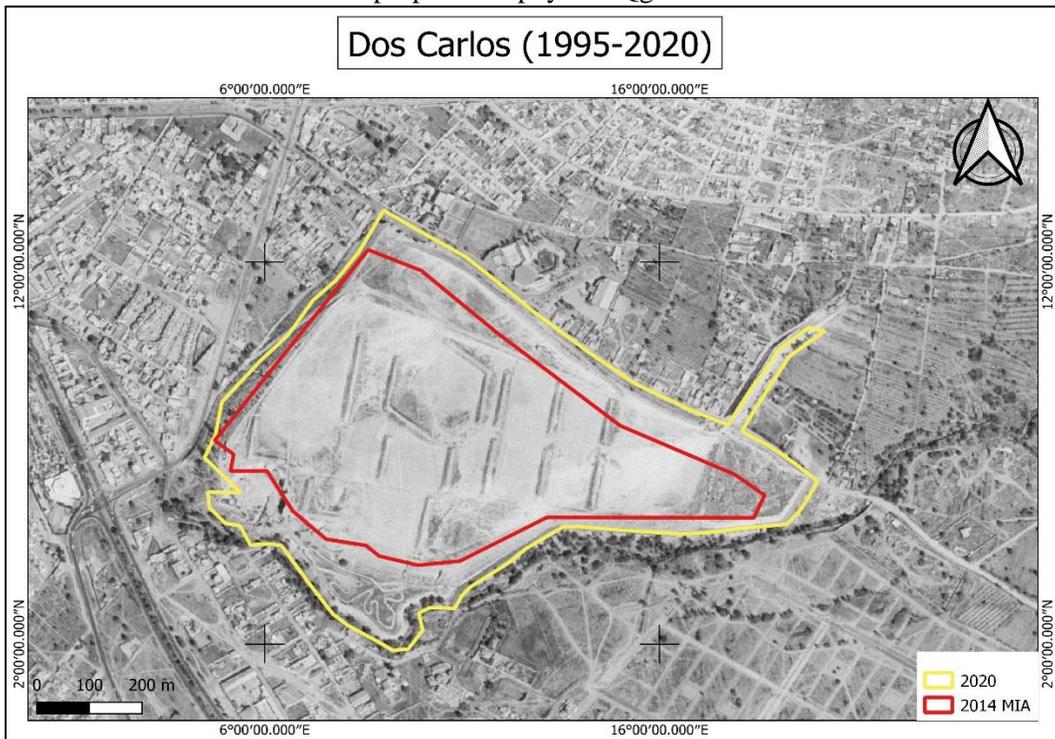
*Ilustración 22. Presa Sur II*

### 5.1.3.DOS CARLOS

Con apoyo de orto imágenes previas al periodo de interés y debido a la falta de imágenes satelitales anteriores al año 2012 con buena calidad, se trabajó bajo el supuesto de que la presa Dos Carlos no ha sufrido cambios importantes en su área (**Ilustraciones 23 y 24**). Se observa que en su esquina suroeste se ha construido previo al periodo analizado un campo deportivo (gotcha) y que la misma presa ha sido utilizada como instalación deportiva (canchas de futbol) (**Ilustración 25**).

Tanto la presa Dos Carlos como la Sur II han estado en la mira de los desarrolladores para mitigar las necesidades de la población en cuanto a viviendas. Sin embargo, de acuerdo con la información georeferenciada presentada en la MIA del Proyecto Pachuca, presentado en 2014 y que contempla la reubicación de los jales al municipio de Epazoyucan, se observa que el área para cambio de uso de suelo no representa el total de la presa. La mancha urbana se ha desarrollado al noreste y sureste de la presa, enfocándose el uso de suelo para uso residencial.

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



*Ilustración 23. Presa Dos Carlos*

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



*Ilustración 24. Presa Dos Carlos*

Obtenido de Google Earth Pro

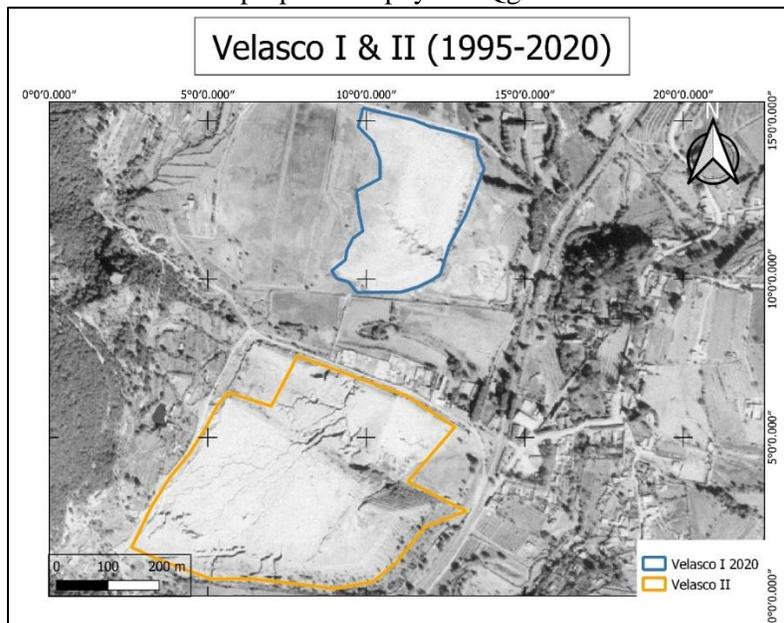


*Ilustración 25. Canchas deportivas sobre presa Dos Carlos*

#### 5.1.4. VELASCO I & II

Las presas ubicadas en el municipio de Omitlán de Juárez no han presentado modificaciones en su polígono. Se visualiza la presencia de una cancha deportiva incluso antes del periodo de interés en la presa Velasco II y poco desarrollo inmobiliario en la periferia de ambas presas (**Ilustración 26**).

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



*Ilustración 26. Presas Velasco I & II*

### 5.1.5. DISCUSIÓN FINAL (OBJETIVO 1)

La evolución del cambio de uso de suelo en la Comarca Minera en torno a la presencia de los jales mostró una reducción del área total de estos, debido principalmente a la urbanización de la presa Sur I (**Tabla 23**).

*Tabla 23. Características de los jales de la Comarca Minera*

Municipio	Presa	1995 (Ha)	2020 (Ha)	% de reducción
Pachuca	Sur I	53.83	0	100
Pachuca	Sur II	231.25	231.25	0
Mineral de la Reforma	Dos Carlos	52.76	0	0
Omitlán de Juárez	Velasco (I y II)	26.64	0	0

Fuente: elaboración propia

Como se observó, a pesar de ser completamente urbanizada, la presa Sur I aún cuenta con diversas áreas donde el talud permanece descubierto y sujeto a fenómenos de transporte (y adyacente a la central de abastos de Pachuca), estas zonas se encuentran principalmente en los alrededores del estadio Hidalgo y son empleadas como áreas peatonales. La preferencia por construir mobiliario urbano en vez de casas habitacionales puede adjudicarse a que el proceso de urbanización del jale comenzó poco después del terremoto del 85 en México (proceso que generó la migración de capitalinos a las principales ciudades de la periferia según Contreras (2016)) y a la aún entonces disponibilidad de terrenos.

El resto de los jales ubicados en la Comarca Minera no presentan modificaciones en sus áreas y permanecen descubiertas, incluso son empleadas como canchas deportivas. Las presas Sur II y Dos Carlos se encuentran rodeadas de infraestructura urbana (escuelas, viviendas, plazas comerciales y avenidas principales), ambas con consideradas para reubicarse al municipio de Epazoyucan. En el caso de la presa Velasco, se observa poco desarrollo urbano y se desconocen sus planes a futuro.

## **5.2. SELECCIÓN DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD PARA POLÍTICAS PÚBLICAS (OBJETIVO 2)**

Por medio de una medición sencilla de indicadores es posible lograr un índice sintético del desarrollo sustentable entre los sectores seleccionados (Pardo, 2014). Debido a la inevitable interacción de los sectores urbano y minero del paradigma que se analiza, la presente tesis requiere implementar un enfoque basado en la integración sectorial (minero) desde el punto de vista de la toma de decisiones. La medición de un indicador se determina por el propio indicador, por lo que se requiere una medición con unidades diferentes (Soriano et al., 2015).

Con base en la información recabada y las ecuaciones mencionadas en la metodología, se llevó a cabo el cálculo del IS para cada indicador y posteriormente los IS' e IS''.

### **5.2.1. INDICADORES SOCIODEMOGRÁFICOS OBTENIDOS**

La información mostrada por el indicador S1 inicialmente muestra los años 2000, 2005, 2010, 2015 (en no todos los municipios). Mediante la implementación de la **Ecuación 1**, se calculó el resto de la información faltante. Este indicador muestra un continuo crecimiento de la población y a la par con el indicador S2. ya que la densidad poblacional no es una escala rígida, diversos autores citados por Gómez & Mesa (2017) consideran que un rango óptimo va de 12 a 35 mil habitantes por Km<sup>2</sup>, cifra que como se observa en las **Tabla 24 y 25**, aún está lejos de ser alcanzada en la Comarca Minera, por lo que el proceso de densificación urbana continuara, lo que lleva a la necesidad de incrementar la densidad de edificios habitacionales o incrementar la mancha urbana.

Tomando en consideración las áreas proporcionadas por el SIG implementado, se calculó el indicador S2 con las siguientes áreas:

- Atotonilco el Grande: 458.51 Km<sup>2</sup>.
- Epazoyucan: 140.80 Km<sup>2</sup>.
- Huasca de Ocampo: 302.85 Km<sup>2</sup>.
- Mineral de la Reforma: 114.02 Km<sup>2</sup>.
- Mineral del Chico: 192.14 Km<sup>2</sup>.
- Mineral del Monte: 53.43 Km<sup>2</sup>.
- Omitlán de Juárez: 79.73 Km<sup>2</sup>.

- Pachuca de Soto: 154 Km<sup>2</sup>.
- Singuilucan: 420.21 Km<sup>2</sup>.

*Tabla 24. Población total (SI)*

Año	SI (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	25423	11054	15308	42223	7013	12855	8022	245208	13269
2001	25095.04	11145.75	15286.57	46542.41	6951.99	12667.32	7920.92	250994.91	13243.79
2002	24771.32	11238.26	15265.17	51303.70	6891.50	12482.37	7821.12	256918.39	13218.63
2003	24451.77	11331.54	15243.80	56552.07	6831.55	12300.13	7722.57	262981.66	13193.51
2004	24136.34	11425.59	15222.46	62337.35	6772.11	12120.55	7625.27	269188.03	13168.44
2005	23823	11522	15201	68704	6714	11944	7529	275578	13143
2006	24416.19	11950.62	15577.98	77738.58	6950.33	12305.90	7796.28	274007.21	13467.63
2007	25024.16	12395.18	15964.32	87961.20	7194.98	12678.77	8073.05	272445.36	13800.28
2008	25647.26	12856.28	16360.23	99528.10	7448.25	13062.94	8359.64	270892.43	14141.15
2009	26285.87	13334.54	16765.97	112616.04	7710.43	13458.75	8656.41	269348.34	14490.44
2010	26940	13830	17182	127404	7980	13864	8963	267862	14851
2011	27244.42	14058.20	17223.24	133468.43	8065.39	13909.75	8995.27	269737.03	14879.22
2012	27552.28	14290.16	17264.57	139821.53	8151.69	13955.65	9027.65	271625.19	14907.49
2013	27863.62	14525.94	17306.01	146477.03	8238.91	14001.71	9060.15	273526.57	14935.81
2014	28178.48	14765.62	17347.54	153449.34	8327.06	14047.91	9092.77	275441.26	14964.19
2015	28496.90	15009.25	17389.18	160753.53	8416.16	14094.27	9125.50	277375	14992.62
2016	28818.92	15256.91	17430.91	168405.40	8506.22	14140.78	9158.35	284392.59	15021.11
2017	29144.57	15508.65	17472.74	176421.49	8597.23	14187.45	9191.32	291587.72	15049.65
2018	29473.90	15764.54	17514.68	184819.16	8689.22	14234.27	9224.41	298964.89	15078.24
2019	29806.96	16024.65	17556.71	193616.55	8782.20	14281.24	9257.62	306528.70	15106.89
2020	30135	16285	17607	202749	8878	14324	9295	314331	15142
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	18.53	47.32	15.02	380.19	26.59	11.43	15.87	28.19	14.12
IS	59.27	73.66	57.51	240.09	63.30	55.71	57.93	64.09	57.06

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Retomando la **Ecuación 1**, se calculó la información faltante del indicador S3. Este indicador muestra un incremento en la derechohabencia en los primeros 15 años. Sin embargo, posterior al año 2015 se observa cómo estas cifras se reducen progresivamente. Según López & Miguel (2018), esto puede atribuirse a diversos factores, como la saturación de los sistemas de salud, preferencia por servicios privados de salud o incluso la reducción en recursos públicos destinados al sector salud.

Como se observa en la **Tabla 26**, la cobertura del servicio de salud se incrementó considerablemente en la mayoría de los municipios, mismos que presentan una mayor diversidad de infraestructura (como se observara en el indicador E2). De acuerdo con Torres et al. (2014), la cobertura de los servicios de salud pública se traduce en una mejora de la sustentabilidad ya que representa una mejor esperanza de vida y reducción de la mortalidad.

**Tabla 25. Densidad poblacional (S2)**

S2 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	55.45	78.51	50.55	370.31	36.50	240.60	100.61	245208	31.58
2001	54.73	79.16	50.48	408.20	36.18	237.08	99.35	250994.91	31.52
2002	54.03	79.82	50.41	449.95	35.87	233.62	98.10	256918.39	31.46
2003	53.33	80.48	50.33	495.98	35.56	230.21	96.86	262981.66	31.40
2004	52.64	81.15	50.26	546.72	35.25	226.85	95.64	269188.03	31.34
2005	51.96	81.83	50.19	602.56	34.94	223.54	94.43	275578	31.28
2006	53.25	84.88	51.44	681.80	36.17	230.32	97.78	274007.21	32.05
2007	54.58	88.03	52.71	771.45	37.45	237.30	101.25	272445.36	32.84
2008	55.94	91.31	54.02	872.90	38.76	244.49	104.85	270892.43	33.65
2009	57.33	94.71	55.36	987.69	40.13	251.89	108.57	269348.34	34.48
2010	58.76	98.22	56.73	1117.38	41.53	259.48	112.42	267862	35.34
2011	59.42	99.85	56.87	1170.57	41.98	260.34	112.82	269737.03	35.41
2012	60.09	101.49	57.01	1226.29	42.43	261.20	113.23	271625.19	35.48
2013	60.77	103.17	57.14	1284.66	42.88	262.06	113.64	273526.57	35.54
2014	61.46	104.87	57.28	1345.81	43.34	262.92	114.04	275441.26	35.61
2015	62.15	106.60	57.42	1409.87	43.80	263.79	114.46	277375	35.68
2016	62.85	108.36	57.56	1476.98	44.27	264.66	114.87	284392.59	35.75
2017	63.56	110.15	57.69	1547.29	44.74	265.53	115.28	291587.72	35.81
2018	64.28	111.96	57.83	1620.94	45.22	266.41	115.70	298964.89	35.88
2019	65.01	113.81	57.97	1698.09	45.71	267.29	116.11	306528.70	35.95
2020	65.72	115.66	58.14	1778.19	46.21	268.09	116.58	314331	36.03
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	18.53	47.32	15.02	380.19	26.59	11.43	15.87	28.19	14.12
IS	59.27	73.66	57.51	240.09	63.30	55.71	57.93	64.09	57.06

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 26. Cobertura de Servicios de Salud (S3)**

S3 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	13.19	29.90	12.03	55.87	9.04	46.65	24.88	56.01	14.58
2001	13.78	29.49	14.10	55.96	8.98	45.97	23.36	56.18	17.16
2002	14.39	29.09	16.53	56.04	8.93	45.31	21.93	56.34	20.20
2003	15.03	28.70	19.37	56.12	8.87	44.65	20.59	56.51	23.78
2004	15.69	28.31	22.70	56.20	8.81	44.00	19.33	56.67	27.99
2005	16.39	27.91	26.60	56.30	8.76	43.37	18.14	56.83	32.95
2006	21.90	33.32	31.86	58.76	13.54	47.36	24.33	58.30	37.57
2007	29.26	39.77	38.17	61.33	20.94	51.71	32.63	59.80	42.84
2008	39.08	47.46	45.72	64.01	32.39	56.46	43.76	61.34	48.85
2009	52.21	56.65	54.76	66.82	50.09	61.65	58.69	62.91	55.70
2010	69.74	67.64	65.60	69.75	77.48	67.34	78.72	64.54	63.50
2011	73.05	71.10	69.33	71.97	79.96	70.75	80.83	67.30	66.01
2012	76.51	74.73	73.28	74.27	82.51	74.33	82.98	70.19	68.62
2013	80.13	78.56	77.44	76.63	85.15	78.10	85.20	73.20	71.34
2014	83.93	82.57	81.85	79.08	87.87	82.05	87.48	76.34	74.16
2015	87.9	86.8	86.5	81.60	90.7	86.2	89.8	79.60	77.1
2016	83.17	81.71	81.87	79.22	84.46	81.21	83.47	77.05	71.43
2017	78.70	76.92	77.50	76.90	78.66	76.51	77.59	74.57	66.17
2018	74.46	72.41	73.35	74.66	73.25	72.08	72.13	72.18	61.31
2019	70.46	68.16	69.43	72.48	68.21	67.90	67.05	69.86	56.80
2020	66.7	64.2	65.7	70.40	63.5	64	62.3	67.60	52.6
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	405.58	114.73	446.00	26.00	602.41	37.19	150.39	20.68	260.88
IS	252.79	107.36	273	63	351.20	68.59	125.19	60.34	180.44

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

Dada la hipótesis de García-Benítez et al. (2019), que supone que un crecimiento descontrolado de la población tiene el potencial de afectar la disponibilidad y calidad de los servicios, se observa que el indicador S4 mantiene una cobertura creciente hasta el 2015 y posteriormente se observa un ligero descenso progresivo. Lo cual puede interpretarse que ha pesar del crecimiento poblacional se ha incrementado la cobertura de los servicios urbanos hasta 2015, pudiéndose implementar como un indicador de eficacia en el manejo de recursos tanto naturales como públicos (**Tabla 27**). La información faltante se calculo mediante la **Ecuación 1**.

*Tabla 27. Índice de Servicios Urbanos (S4)*

Año	S4 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	69.98	80.44	67.73	93.99	62.67	81.76	75.49	96.94	65.81
2001	71.51	82.07	70.11	94.09	62.69	82.99	76.75	96.27	69.01
2002	73.07	83.74	72.58	94.19	62.72	84.24	78.04	95.60	72.35
2003	74.66	85.43	75.14	94.28	62.74	85.50	79.34	94.93	75.86
2004	76.29	87.17	77.78	94.38	62.77	86.78	80.67	94.27	79.54
2005	77.93	88.93	80.51	94.47	71.70	88.08	82.02	93.61	83.42
2006	79.21	89.53	81.22	94.87	75.61	88.96	81.92	94.00	83.95
2007	80.50	90.13	81.93	95.27	79.72	89.85	81.82	94.38	84.48
2008	81.81	90.74	82.65	95.68	84.06	90.76	81.72	94.77	85.02
2009	83.15	91.35	83.37	96.08	88.64	91.67	81.62	95.16	85.56
2010	84.53	91.98	84.10	96.49	82.69	92.61	81.55	96.85	86.10
2011	85.53	92.99	85.33	97.01	84.44	93.14	83.32	96.15	87.07
2012	86.54	94.01	86.57	97.54	86.22	93.67	85.13	96.73	88.05
2013	87.57	95.04	87.84	98.07	88.05	94.21	86.98	97.32	89.04
2014	88.61	96.08	89.12	98.60	89.90	94.74	88.87	97.92	90.04
2015	89.67	97.15	90.44	99.13	88.62	95.27	90.82	98.53	91.06
2016	86.85	94.95	88.32	99.01	85.25	93.54	87.97	98.03	88.39
2017	84.13	92.79	86.25	98.88	82.00	91.85	85.22	97.54	85.79
2018	81.49	90.69	84.23	98.76	78.88	90.19	82.55	97.05	83.27
2019	78.93	88.63	82.26	98.63	75.88	88.55	79.96	96.56	80.82
2020	76.43	86.60	80.32	98.49	76.74	86.96	77.45	96.04	78.46
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100.00	100
%cre	9.23	7.66	18.60	4.78	22.46	6.35	2.60	-0.93	38.37
IS	54.61	53.83	59.3	52.39	61.23	53.18	51.30	49.54	69.18

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

El bajo índice del indicador S5 puede deberse más a las costumbres y capacidad adquisitiva de la población, mostrando que se requiere fomentar en la población la educación ambiental, el manejo integral de residuos sólidos urbanos y dar continuidad a la recolección de información de este indicador (**Tabla 28**). Debido a la falta de un segundo dato no es posible implementar la **Ecuación 1**.

**Tabla 28. Índice de Viviendas Sustentables (S5)**

S5 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2015	5.69	10.58	7.61	10.52	6.90	3.76	4.78	8.88	5.23
%inf	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76
%cre	5.69	10.58	7.61	10.52	6.90	3.76	4.78	8.88	5.23
IS	5.23	7.67	6.19	7.64	5.83	4.26	4.77	6.82	4.99

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

El indicador S6, muestra que menos del 31% de la población (de 3 a 24 años) ha carecido de estudios escolarizados desde el 2015. Varios municipios presentan un ligero descenso en el año 2019 (Epazoyucan, Huasca de Ocampo, Mineral de la Reforma, Mineral del Chico, Pachuca y Singuilucan). Lo cual puede interpretarse como la necesidad de crear políticas públicas que faciliten el acceso a la educación (Ceballos & Piña , 2017). No hay información antes del 2015 (Tabla 29).

**Tabla 29. Cobertura de educación en población de 3 a 24 años (S6)**

S6 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2015	69.75	76.1	72.975	81.08	75.23	75.50	70.10	80.28	71.03
2016	70.29	75.72	72.51	80.84	75.07	75.43	70.46	78.16	70.88
2017	70.85	75.35	72.08	80.61	74.93	75.36	70.86	76.09	70.74
2018	71.43	74.98	71.66	80.37	74.81	75.30	71.30	74.08	70.60
2019	72.04	74.62	71.27	80.14	74.72	75.24	71.77	72.13	70.46
2020	72.68	74.275	70.9	79.90	74.65	75.18	72.28	70.22	70.33
%inf	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57
%cre	4.19	-2.40	-2.84	-1.45	-0.76	-0.43	3.10	-12.53	-0.99
IS	16.38	13.09	12.86	13.56	13.90	14.07	15.84	8.02	13.79

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

## 5.2.2. INDICADORES AMBIENTALES OBTENIDOS

Mediante la implementación de SIG y la consulta de documentos gubernamentales (inventarios y programas de desarrollo) se llevó a cabo el cálculo de las ANP en la Comarca Minera. Tomando como referencia el catálogo de ANP a nivel federal y aquellas zonas consideradas como ANP estatales y municipales se tomaron en consideración las siguientes áreas para elaborar las **Tabla 30 e Ilustración 27**:

- Atotonilco el Grande: parte de Barranca Metztitlán con 10186.86 Ha desde el 2000.

- Huasca de Ocampo: parte de Barranca Metztitlán con 7186.34 Ha desde el 2000.
- Mineral de la Reforma: parte del parque Cubitos con 272.08 Ha desde 2002.
- Mineral del Chico: parte del parque El Chico con 2362 Ha desde 1982.
- Mineral del Monte: parte del parque El Chico con 20.19 Ha desde 1982; El Hiloche con 99.6 Ha desde 2004.
- Pachuca: Cerro del Lobo con 21.81 Ha desde 1988; parte del parque Cubitos con 146.11 desde 2002; parte del parque El Chico con 350.16 Ha desde 1982.
- Singuilucan: La Paila con 24.27 Ha desde 2005; El Susto con 11.99 Ha desde 2005.

Con excepción de Epazoyucan y Omitlán de Juárez, todos los municipios presentan superficie de ANP, misma que no se ha reducido en el periodo analizado.

*Tabla 30. Porcentaje de superficie de Área Natural Protegida (AI)*

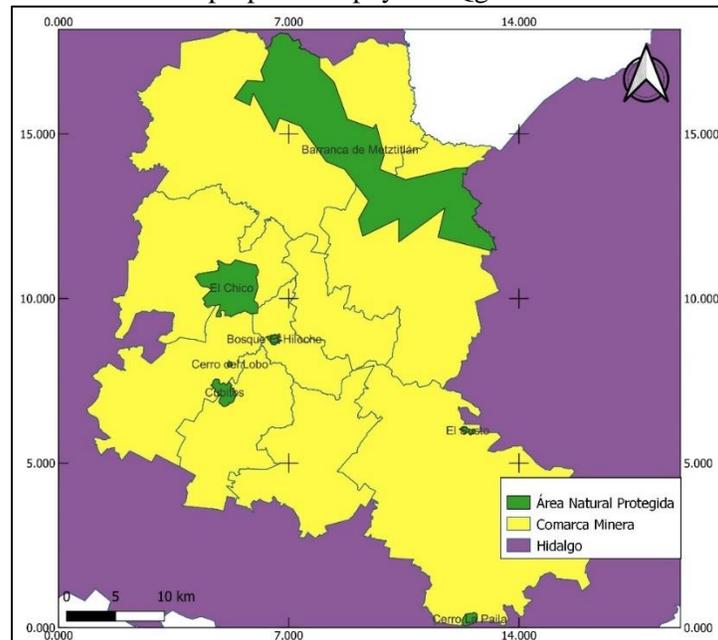
Año	AI (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	22.22	0	23.73	2.39	12.30	0.38	0	2.42	0
2001	22.22	0	23.73	2.39	12.30	0.38	0	2.42	0
2002	22.22	0	23.73	2.39	12.30	0.38	0	3.33	0
2003	22.22	0	23.73	2.39	12.30	0.38	0	3.33	0
2004	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0
2005	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2006	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2007	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2008	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2009	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2010	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2011	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2012	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2013	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2014	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2015	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2016	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2017	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2018	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2019	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
2020	22.22	0	23.73	2.39	12.30	2.24	0	3.33	0.09
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	22.22	0	23.73	2.39	12.3	493.31	0	37.94	0.09
<b>IS</b>	<b>61.11</b>	<b>50</b>	<b>61.87</b>	<b>51.20</b>	<b>56.15</b>	<b>296.66</b>	<b>50</b>	<b>68.97</b>	<b>50.05</b>

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2



*Ilustración 27. Área Natural Protegida de la Comarca Minera*

La definición de áreas verdes es variable (la legislación del estado de Hidalgo no cuenta con una), según la Ley Ambiental de Protección a la Tierra de la Ciudad de México las define como toda superficie con vegetación (natural o inducida) dentro de la zona urbana, pudiendo referirse a parques, jardines, bosques urbanos, glorietas camellones, barrancas, áreas con pasto, incluso centros deportivos, cementerios y hasta tierras con potencial agrícola, son de carácter público o privado. Tienen la característica de brindar servicios ecosistémicos y recreativos.

Si bien es posible estimar la SIAV, misma que va en aumento debido al crecimiento del indicador S1, la ausencia de bases de datos que calculen periódicamente la superficie de áreas verdes a nivel municipal obliga la consulta y referencia de documentos gubernamentales; planes de desarrollo y planes municipales para la obtención de información. Si bien existe el consenso y la intención política de preservar e incrementar las áreas verdes, estas acciones se ven mermadas por su apropiación ilegal. Pachuca es el único municipio que cuenta con dicha información en 4 años del periodo analizado (**Tabla 31**).

**Tabla 31. Déficit de áreas verdes (A2)**

A2 (-)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2009	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	-172.41	SD
2012	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	-201.37	SD
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	-185.95	SD
2020	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	-233.86	SD
%inf	0	0	0	0	0	0	0	19.05	0
%cre	0	0	0	0	0	0	0	-35.64	0
IS	0	0	0	0	0	0	0	-8.29	0

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Con apoyo del SIG, programas de desarrollo e inventarios forestales (SEMARNAT et al., 2008, SEMARNAT & CONAFOR, 2014, SEMARNAT & CONAFOR, 2021) se elabora la **Tabla 32** y la **Ilustración 28**. Muestra como la superficie forestal inicialmente mostraba un incremento en casi todos los municipios entre 2008 y 2014. Sin embargo, en años posteriores esto se ha reducido en casi todos los municipios generando una clasificación de muy baja sostenibilidad.

**Tabla 32. Porcentaje de superficie forestal (A3) (elaboración propia).**

A3 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2008	29.9	22.4	33.3	7.1	62	64.9	46.7	20.99	38.7
2014	35.26	24.76	37.28	10.26	68.12	68.71	48.77	15.30	36.31
2019	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	28.23	SD
2020	19.79	11.10	35.20	3.64	64.19	51.29	45.75	41.25	35.33
%inf	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.3	14.29	14.29
%cre	-33.83	-50.46	5.70	-48.73	3.53	-20.98	-2.03	96.49	ND
IS	-9.77	-18.09	10	-17.22	8.91	-3.35	6.13	55.39	2.79

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

La información que arroja el RETC muestra el periodo 2004 a la fecha, por lo que él %inf mostrara siempre un 100% de cumplimiento. Diversos municipios no presentan información de registro de COA, los que sí, muestran una discontinuidad e incluso un nulo seguimiento de este trámite (**Tabla 33**). Por lo que se requiere reforzar la vigilancia ambiental en el estado.

Elaboración propia con apoyo de Qgis versión 3.24.2

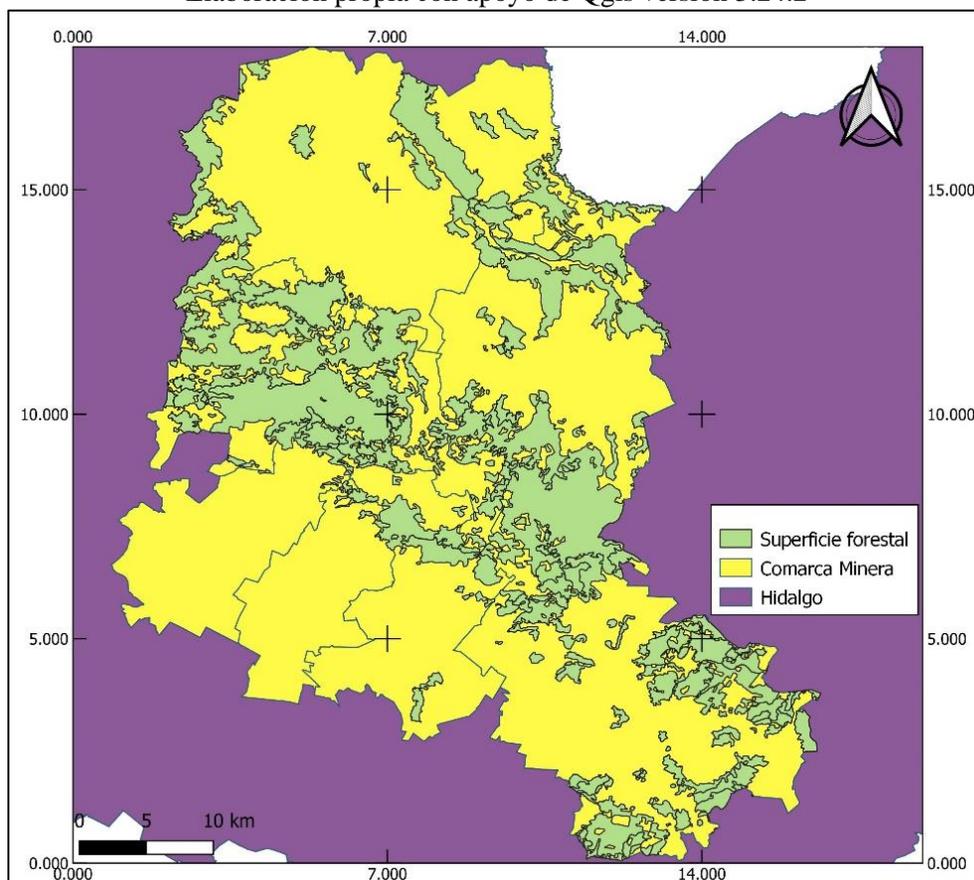


Ilustración 28. Superficie forestal en la Comarca Minera (2020)

Tabla 33. Seguimiento de COA registradas (A4)

Año	A4 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2004	0	0	0	100	0	0	0	100	0
2005	0	0	0	100	0	0	0	100	0
2006	0	0	0	33.33	0	0	0	50	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	25	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	12.5	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	12.5	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	12.5	0
2011	0	0	0	0	0	0	0	12.5	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	36.36	0
2013	0	0	0	0	0	0	0	33.33	0
2014	0	0	0	33.33	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	33.33	0	0	0	8.33	0
2016	0	0	0	33.33	0	0	0	8.33	0
2017	0	0	0	0	0	0	0	16.67	0
2018	0	0	0	33.33	0	0	0	15.38	0
2019	0	0	0	33.33	0	0	0	7.69	0
2020	0	0	0	0	0	0	0	7.69	0
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	0	0	0	-100	0	0	0	-92.31	0
IS	50	50	50	0	50	50	50	3.85	50

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

El indicador A5 trabajo bajo el supuesto de que cada municipio se suministra con concesiones de agua para uso doméstico exclusivamente. De acuerdo con el RPDA tres municipios no cuentan con concesión para uso doméstico, sin embargo, el resto de las concesiones en esos municipios abarcan el uso agrícola, servicios, industrial, público urbano, diferentes usos y pecuario. Todos los municipios con agua concesionada (excepto Pachuca) han reducido progresivamente su volumen desde 2005 (**Tabla 34**). Por lo que el derecho al agua respecto al volumen puede comprometerse en los próximos años.

Bajo el supuesto de que las tarifas de agua doméstica que implementa el organismo regulador (CAASIM en este caso) se aplican a todos los municipios (CAASIM, 2022) y tomando en consideración el salario mínimo promedio a nivel nacional, se observa que el derecho al agua (precio) se ha incrementado de forma general (CONASAMI, 2021) según el indicador A6 (**Tabla 35**).

**Tabla 34.** Derecho al agua (volumen) (A5)

Año	A5 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	1.45	0	24.84	0	0.82	0.35	1.53	0.08	0
2001	1.47	0	25.17	0	0.82	0.36	1.85	0.08	0
2002	1.48	0	25.20	0	0.83	0.36	1.87	0.08	0
2003	1.54	0	25.24	0	0.84	0.37	1.90	0.08	0
2004	1.56	0	25.46	0	0.85	0.37	1.92	0.08	0
2005	1.59	0	25.49	0	0.85	0.38	1.94	0.08	0
2006	1.55	0	24.88	0	0.82	0.37	1.88	0.08	0
2007	1.51	0	24.27	0	0.80	0.35	1.81	0.08	0
2008	1.47	0	23.69	0	0.77	0.34	1.75	0.08	0
2009	1.44	0	23.11	0	0.74	0.33	1.69	0.08	0
2010	1.40	0	22.55	0	0.72	0.32	1.63	0.08	0
2011	1.39	0	22.50	0	0.71	0.32	1.63	0.08	0
2012	1.37	0	22.45	0	0.70	0.32	1.62	0.08	0
2013	1.36	0	22.39	0	0.70	0.32	1.62	0.08	0
2014	1.34	0	22.34	0	0.69	0.32	1.61	0.08	0
2015	1.33	0	22.42	0	0.68	0.32	1.60	0.07	0
2016	1.31	0	22.37	0	0.67	0.32	1.60	0.07	0
2017	1.30	0	22.32	0	0.67	0.32	1.59	0.07	0
2018	1.28	0	22.26	0	0.66	0.32	1.59	0.07	0
2019	1.27	0	22.21	0	0.65	0.32	1.58	0.07	0
2020	1.25	0	22.15	0	0.65	0.31	1.58	0.07	0
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	-13.34	0	-10.83	0	-21.01	-10.26	3.23	-21.99	0
IS	43.33	50	44.58	50	39.50	44.87	51.61	39	50

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 35. Derecho al agua (precio) (A6)**

Año	A6 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2005	116.97	116.97	116.97	116.97	116.97	116.97	116.97	116.97	116.97
2006	133.93	133.93	133.93	133.93	133.93	133.93	133.93	133.93	133.93
2007	154.01	154.01	154.01	154.01	154.01	154.01	154.01	154.01	154.01
2008	178.84	178.84	178.84	178.84	178.84	178.84	178.84	178.84	178.84
2009	206.90	206.90	206.90	206.90	206.90	206.90	206.90	206.90	206.90
2010	205.54	205.54	205.54	205.54	205.54	205.54	205.54	205.54	205.54
2011	204.14	204.14	204.14	204.14	204.14	204.14	204.14	204.14	204.14
2012	203.90	203.90	203.90	203.90	203.90	203.90	203.90	203.90	203.90
2013	202.95	202.95	202.95	202.95	202.95	202.95	202.95	202.95	202.95
2014	294.38	294.38	294.38	294.38	294.38	294.38	294.38	294.38	294.38
2015	306.11	306.11	306.11	306.11	306.11	306.11	306.11	306.11	306.11
2016	317.57	317.57	317.57	317.57	317.57	317.57	317.57	317.57	317.57
2017	342.26	342.26	342.26	342.26	342.26	342.26	342.26	342.26	342.26
2018	344.17	344.17	344.17	344.17	344.17	344.17	344.17	344.17	344.17
2019	298.91	298.91	298.91	298.91	298.91	298.91	298.91	298.91	298.91
2020	273.76	273.76	273.76	273.76	273.76	273.76	273.76	273.76	273.76
%inf	76.19	76.19	76.19	76.19	76.19	76.19	76.19	76.19	76.19
%cre	134.03	134.03	134.03	134.03	134.03	134.03	134.03	134.03	134.03
IS	105.11	105.11	105.11	105.11	105.11	105.11	105.11	105.11	105.11

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Debido al incremento de la flota vehicular, es previsible un incremento de emisión de CO<sub>2</sub> (Tabla 36). Este indicador muestra la necesidad de contar con áreas verdes para mitigar la emisión de CO<sub>2</sub>. Se estima que 68% de emisiones PM<sub>2.5</sub> son emitidas por la flota vehicular de Pachuca (SEMARNAT & SEMARNATH , 2016).

El indicador A8 muestra que la generación per cápita de residuos se ha reducido progresivamente en Mineral del Chico y Omitlán de Juárez, mostrando niveles bajos de sustentabilidad (Tabla 37).

Tabla 36. Emisión de CO<sub>2</sub> (A7)

A7 (-)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	1.81	0.84	0.86	1.67	0.34	0.80	0.44	28.97	0.71
2001	2.07	0.94	1.05	2.15	0.39	0.92	0.52	32.45	0.87
2002	2.28	1.00	1.17	2.72	0.44	0.95	0.58	35.49	0.99
2003	2.48	1.08	1.29	3.27	0.49	1.03	0.64	38.38	1.11
2004	2.71	1.16	1.41	3.93	0.54	1.10	0.69	41.74	1.22
2005	2.88	1.23	1.53	4.56	0.58	1.18	0.76	44.62	1.36
2006	3.18	1.41	1.78	5.78	0.67	1.32	0.88	48.81	1.56
2007	3.48	1.57	1.97	7.14	0.76	1.44	1.00	52.85	1.77
2008	3.72	1.72	2.14	8.30	0.84	1.53	1.11	56.26	1.96
2009	3.82	1.75	2.20	8.99	0.87	1.59	1.11	57.36	2.03
2010	3.95	1.83	2.27	9.97	0.91	1.66	1.15	59.54	2.09
2011	4.03	1.87	2.31	10.79	0.93	1.71	1.16	61.29	2.13
2012	4.12	1.91	2.35	11.67	0.95	1.77	1.18	63.12	2.18
2013	4.30	2.05	2.48	14.55	1.03	1.90	1.26	63.17	2.24
2014	4.40	2.11	2.55	15.80	1.07	1.96	1.28	65.73	2.32
2015	4.56	2.35	2.63	17.36	1.09	2.08	1.33	68.36	2.38
2016	4.68	2.39	2.68	18.58	1.12	2.14	1.35	71.43	2.44
2017	3.82	1.89	2.18	17.28	0.89	1.70	1.06	57.86	1.95
2018	3.53	1.79	1.95	18.03	0.82	1.66	0.97	52.30	1.76
2019	3.29	1.71	1.81	18.55	0.79	1.54	0.89	50.28	1.65
2020	3.11	1.65	1.67	18.75	0.75	1.49	0.85	50.47	1.55
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	-12.51	-96.97	-94.03	-1023.90	-123.52	-87.82	-90.92	-74.22	-117.18
IS	43.75	1.52	2.98	-461.95	-11.76	6.09	4.54	12.89	-8.59

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 37. Generación per cápita de residuos (A8) (elaboración propia).

A8 (-)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2010	149.03	SD	254.92	257.84	205.83	658.18	244.34	517.80	196.62
2012	158.97	153.25	338.26	313.26	179.10	549.24	363.88	163.60	133.44
2014	181.34	123.60	231.44	261.65	87.67	389.74	120.43	424.05	170.74
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	487.71	SD
2018	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	463.93	SD
%inf	14.29	9.52	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	23.81	14.29
%cre	-21.68	-19.35	9.21	-1.48	57.41	40.79	50.71	10.40	13.16
IS	-3.70	14.44	11.75	6.40	35.85	27.54	32.50	17.11	13.72

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

### 5.2.3. INDICADORES ECONÓMICOS OBTENIDOS

El VAB o PIB se considera como el valor total del conjunto de bienes y servicios creado por un sector en un periodo de tiempo. La **Tabla 38** muestra como se ha incrementado el VAB en cada municipio, a pesar de que Mineral del Chico muestra un mayor incremento, Pachuca es el municipio que más PIB aporta al estado, lo cual influye en la concentración y

relocalización de sus sectores económicos y en consecuencia genera una urbanización acelerada, pero a la vez, la percepción de que es un lugar adecuado para residir (Salas, 2009).

**Tabla 38. Valor Agregado Bruto (E1)**

Año	E1 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2004	82.95	24.88	25.33	1650.48	2.60	40.70	4.15	8126.519	51.65
2009	102.13	14.54	47.07	2172.12	22.15	54.88	3.67	7859.456	72.33
2014	141.0	11.60	58.45	2234.10	17.05	58.67	9.98	9209.946	69.01
%inf	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29
%cre	69.99	-53.37	130.77	35.36	554.98	44.16	140.55	13.33	33.60
IS	42.14	-19.54	72.53	24.82	284.63	29.22	77.42	13.81	23.95

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Como hace mención Granados (2007), a medida que se incrementa la población aumentan las actividades económicas. Las UE en los diferentes municipios se han incrementado progresivamente (Tabla 39).

**Tabla 39. Unidades Económicas (E2)**

Año	E2 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2003	689	137	111	1231	54	507	87	11580	310
2004	689	137	111	1231	54	507	87	11580	310
2008	884	155	155	3237	72	619	114	15570	199
2009	884	155	155	3237	72	619	114	15517	199
2014	932	179	200	4537	82	701	113	17632	272
%inf	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81
%cre	35.27	30.66	80.18	268.56	51.85	38.26	29.89	52.26	-12.26
IS	29.54	27.23	51.99	146.19	37.83	31.04	26.85	38.04	5.78

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Un incremento en los ingresos puede implementarse en beneficio de las áreas verdes (Chen et al, 2020). En el caso de Pachuca (único municipio que registra sus áreas verdes), se observa que a pesar del incremento en su utilidad su DAV se incrementa (Tabla 40).

A pesar de que se considera que la empleabilidad no ha sido muy dinámica (Granados, 2007), el indicador E4 muestra que el desempleo (en población de 12 años y más) se ha reducido progresivamente desde 2014 (Tabla 41).

**Tabla 40. Utilidad (E3)**

E3 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2003	84.10	17.92	25.34	1.59	2.58	36.88	4.48	6961.87	48.34
2004	84.10	17.92	25.34	1.6	2.58	36.88	4.48	6954.50	48.34
2008	98.83	15.43	46.14	2.14	17.84	57.61	3.62	6467.63	70.99
2009	98.83	15.43	46.14	2.14	17.84	57.61	3.62	5630.51	70.99
2014	117.75	14.69	48.16	2.2	14.54	54.57	9.46	9457.92	73.29
%inf	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81	23.81
%cre	40.00	-18.04	90.06	38.36	463.57	47.97	111.16	35.85	51.61
IS	31.91	2.89	56.93	31.09	243.69	35.89	67.49	29.83	37.71

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 41. Tasa de desempleo (E4) (elaboración propia).**

E4 (-)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2014	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	4.20	SD
2015	10.29	4.60	0.04	6.30	7.22	5.99	12.20	4.00	9.03
2016	8.63	4.62	0.03	5.56	5.40	5.35	9.46	3.81	8.01
2017	7.24	4.64	0.02	4.89	4.04	4.77	7.34	3.63	7.11
2018	6.07	4.67	0.02	4.31	3.03	4.26	5.69	3.46	6.31
2019	5.09	4.69	0.01	3.80	2.27	3.80	4.42	3.30	5.60
2020	1.69	4.71	0.01	3.35	1.69	3.39	3.42	3.30	4.97
%inf	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	33.33	28.57
%cre	83.55	-2.47	76.56	46.89	76.52	43.43	71.92	21.45	44.93
IS	56.06	13.05	52.56	37.73	52.55	36	50.24	27.39	36.75

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

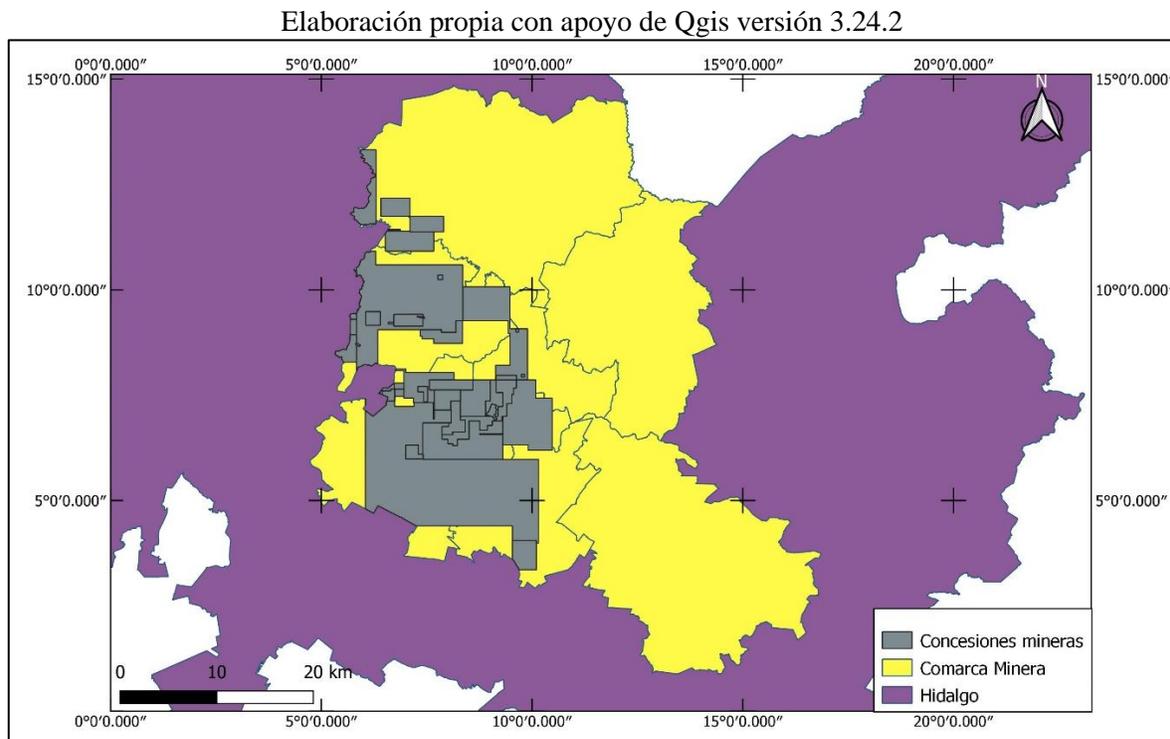
## 5.2.4. INDICADORES MINEROS-JALES OBTENIDOS

El indicador M1 toma en consideración las concesiones mineras vigentes y el porcentaje que ocupan de la superficie municipal. Con la implementación de archivos shp (estados, municipios y concesiones mineras), se elaboró la **Ilustración 29** y la **Tabla 42**, que muestra que las concesiones mineras (vigentes) ocupan un área total de 487.95 Km<sup>2</sup> (lo cual representa un 25.47% del total de la Comarca Minera). Así como también se observa un incremento en las concesiones en los municipios que ya presentaban un área concesionada, siendo Atotonilco el Grande y Epazoyucan los más recientes en tener concesiones, desde 2009.

Cabe recordar que, de acuerdo con la LM, dichas concesiones tienen una duración de 50 años con opción a renovarse (Art. 15), se prioriza la explotación minera sobre cualquier otro uso

del terreno (Art. 4), se prioriza el uso del agua (Art. 19), así como también se condicionan terrenos libres con superficie de hasta 10 Ha adyacentes al área concesionada a ser lotes mineros. Finalmente, la exploración y explotación minera puede llevarse a cabo en poblaciones y obras públicas (incluso ANP) con autorización de las autoridades. No se asigna responsabilidad a los concesionarios para el cuidado del medio ambiente y protección ecológica al concluir las etapas de exploración, explotación y beneficio (Art. 39); así como tampoco se pone a consideración la cancelación de la concesión ante impactos ambientales irreversibles (Art. 40, 42 y 55) a menos que se tomen a consideración como daños a bienes públicos, servicios públicos o propiedad privada (Art. 43). Solo se asigna responsabilidad del cumplimiento de la normativa ambiental vigente (Art. 27 y 39).

Dado que el proceso de urbanización puede obstaculizar los procesos de transporte de contaminantes y que tiene el potencial de reducir varias presiones urbanas, como la demanda de viviendas o de áreas verdes, el indicador M2 se le asigna un valor positivo. Los municipios que no cuentan con jales tuvieron un % cre de cero. Siendo Pachuca el único municipio que ha urbanizado sus jales al 2020 ha urbanizado un 73.57% (**Tabla 43**).



*Ilustración 29. Área bajo concesión minera en municipios de la Comarca Minera*

Tabla 42. Área concesionada (M1)

M1 (-)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	0	0	0	0.64	0.84	0	0	9.14	0
2001	0	0	0	0.64	3.03	0	0	9.14	0
2002	0	0	0	0.88	3.03	6.25	0.00	9.14	0
2003	0	0	0	8.51	5.65	21.43	0.84	14.01	0
2004	0	0	0	8.51	5.65	21.43	0.84	14.01	0
2005	0	0	0	8.51	5.65	21.43	0.84	14.01	0
2006	0	0	0	8.51	5.65	21.43	0.84	14.01	0
2007	0	0	0	8.51	5.65	21.43	0.84	14.01	0
2008	0	0	0	8.51	5.65	21.43	0.84	14.01	0
2009	2.61	5.36	0	8.51	5.71	21.43	0.84	14.01	0
2010	2.61	5.36	0	26.42	10.62	21.45	0.84	18.98	0
2011	2.61	33.68	0	82.82	10.92	21.45	0.84	58.53	0
2012	3.32	35.82	0	84.95	66.39	69.72	17.07	62.36	0
2013	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2014	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2015	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2016	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2017	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2018	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2019	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
2020	205.13	35.82	0	84.95	68.57	69.72	17.07	62.36	0
%inf	100	100	100	100	100	90.48	90.48	100	100
%cre	-7763.98	-568.30	0	-898.28	-8058.45	-1015.20	-1934.22	-582.05	0
IS	-3831.99	-234.15	50	-399.14	-3979.23	-457.60	-917.11	-241.02	50

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 43. Área de jales urbanizada (M2)

M2 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2000	0	0	0	0	0	0	0	28.60	0
2001	0	0	0	0	0	0	0	28.60	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	28.60	0
2003	0	0	0	0	0	0	0	28.60	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	28.60	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2006	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2011	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2013	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2014	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2015	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2016	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2017	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2018	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2019	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
2020	0	0	0	0	0	0	0	42.08	0
%inf	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%cre	0	0	0	0	0	0	0	47.15	0
IS	50	50	50	50	50	50	50	73.57	50

Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia.

Debido al declive de la industria minera, las pocas UE mineras se han reducido en el periodo analizado (**Tabla 44**).

Se observa que la empleabilidad que genera la industria minera ha ido disminuyendo en los municipios que presentan actividad minera, excepto Pachuca, que ha mantenido cifras constantes a pesar de la reducción del indicador M3 y Epazoyucan que muestra un incremento en el 2014 (**Tabla 45**).

**Tabla 44.** Unidades Económicas Mineras (M3) (elaboración propia).

M3 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2003	SD	SD	SD	SD	SD	15	SD	13	SD
2004	SD	6	SD	SD	SD	15	SD	13	3
2008	SD	SD	SD	SD	SD	8	SD	SD	SD
2009	SD	5	SD	SD	SD	8	SD	10	SD
2014	SD	3	SD	SD	SD	7	SD	SD	SD
%inf	100	14.29	100	100	100	23.81	100	14.29	4.76
%cre	0	-50	0	0	0	-53.33	0	-23.08	3.00
<b>IS</b>	<b>50</b>	<b>-17.86</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>-14.76</b>	<b>50</b>	<b>-4.40</b>	<b>3.88</b>

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 45.** Empleabilidad minera (M4)

M4 (+)									
Año	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2003	SD	33	SD	SD	SD	101	SD	294	14
2004	SD	33	SD	SD	SD	101	SD	294	14
2008	SD	20	SD	SD	SD	31	SD	292	6
2009	SD	20	SD	SD	SD	31	SD	292	SD
2014	SD	24	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
%inf	100	23.81	100	100	100	19.05	100	19.05	14.29
%cre	0	-27.27	0	0	0	-69.31	0	-0.68	-57.14
<b>IS</b>	<b>50</b>	<b>-1.73</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>-25.13</b>	<b>50</b>	<b>9.18</b>	<b>-21.43</b>

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

La utilidad minera registrada ha ido reduciéndose progresivamente en los municipios con actividad minera. Epazoyucan, a pesar de su ligero incremento en 2014 muestra una utilidad constante. (**Tabla 46**).

**Tabla 46. Utilidad minera (M5)**

Año	M5 (+)								
	Atotonilco el Grande	Epazoyucan	Huasca de Ocampo	Mineral de la Reforma	Mineral del Chico	Mineral del Monte	Omitlán de Juárez	Pachuca de Soto	Singuilucan
2003	SD	1.498	SD	SD	SD	9.536	SD	5.79	1.30
2004	SD	1.498	SD	SD	SD	8.536	SD	5.79	0.29
2008	SD	0.476	SD	SD	SD	2.043	SD	2.659	0.13
2009	SD	0.476	SD	SD	SD	2.043	SD	2.659	SD
2014	SD	0.476	SD	SD	SD	2.462	SD	SD	SD
%inf	100	23.81	100	100	100	23.81	100	19.05	14.29
%cre	0	-68.22	0	0	0	-74.18	0	-54.08	-90.07
<b>IS</b>	50	-21.22	50	50	50	-25.19	50	-17.51	-37.89

Niveles de sostenibilidad:  
Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.  
Fuente: elaboración propia.

Al tomar la información de todos los indicadores de los cuatro ámbitos, se procedió a calcular el IS'' (Tabla 47). Se observa que, al considerar los indicadores desarrollados en la presente investigación de los tres ámbitos básicos del desarrollo sustentable, se obtiene un índice de baja sustentabilidad. Sin embargo, al agregar el ámbito minero-jales, mismo que presento niveles de muy baja sustentabilidad, se obtiene un IS'' de muy baja sustentabilidad, según la escala implementada.

**Tabla 47. Cálculo del IS''**

Municipio	IS'				→	$= \frac{S + A + E}{3}$	$= \frac{S + A + E + M}{4}$
	S	A	E	M			
Atotonilco el Grande	74.59	36.23	39.91	-726.40	→	50.24	-143.92
Epazoyucan	54.88	31.62	5.91	-45.19	→	30.80	11.80
Huasca de Ocampo	77.73	35.79	58.50	50	→	57.34	55.50
Mineral del Chico	102.80	-33.31	59.96	-39.83	→	43.15	22.40
Mineral del Monte	93.13	35.47	154.67	-755.85	→	94.42	-118.14
Mineral de la Reforma	41.92	65.87	33.04	-94.54	→	46.94	11.57
Omitlán de Juárez	52.16	37.49	55.50	-143.42	→	48.38	0.43
Pachuca de Soto	42.15	36.75	27.27	-36.04	→	35.39	17.53
Singuilucan	63.75	32.89	26.05	8.91	→	40.90	32.90
IS''	49.73				←	$IS'' = \frac{447.57}{9}$	$IS'' = \frac{-109.91}{9}$
	-12.21						

Donde:

A: indicadores ambientales; E: indicadores económicos; IS'': índice de sustentabilidad total; M: minero-jales; S: indicadores sociodemográficos Niveles de sostenibilidad:

Amarillo: moderado; Naranja: bajo; Rojo: muy bajo; Verde claro: alto; Verde oscuro: muy alto.

Fuente: elaboración propia

Se construyó un índice de sustentabilidad con indicadores seleccionados en los ámbitos socio-demográfico, ambiental, económico y minero con su escala de jerarquía para la clasificación del grado de impacto, que puede ser aplicado a otras zonas habitacionales con presencia histórica de pasivos mineros e incluso de otro tipo. Se le llamó Índice Urbano/Minero de Sustentabilidad (IUMS).

En el **Anexo C** se muestra la información para el desarrollo de los indicadores empleados.

La selección de los indicadores implementados se basó en referencias científicas, documentos gubernamentales. Esto deja como antecedente su implementación en las políticas públicas, lo cual orienta su desarrollo.

Para futuras investigaciones se recomienda obtener información sobre el consumo de combustibles fósiles para calcular la emisión de los gases de efecto invernadero; volúmenes de agua residual tratada y reutilizada; generación de energía por medio de fuentes renovables; cantidad de residuos sometidos a una gestión integral. Sin embargo, la información necesaria para el cálculo de estos indicadores difícilmente está disponible en bases de datos.

### 5.3.EVALUAR IMPACTOS CON MATRIZ CONESA (OBJETIVO 3)

Mediante la aplicación de la Matriz Conesa (o Matriz de Importancia), se tomaron a consideración los principales impactos que genera cada indicador descrito con anterioridad.

La clasificación de las UIP se realizó de forma equivalente para que cada ámbito e impactos tuvieran la misma cantidad. Diversos impactos ambientales se mantienen constantes en varios indicadores (**Tabla 48**).

*Tabla 48. Matriz Conesa (elaboración propia).*

Etapa: Desarrollo urbano sustentable post-minero																		
Ámbito	UIP	Indicador	UIP	Impacto ambiental	UIP	I=+/-[3I+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC]												
						N	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	I	
SOCIODEMOGRÁFICO	250	S1. Población total	41.67	Consumo de agua	10.42	-1	2	2	1	4	3	4	4	4	4	4	38	
				Generación de aguas residuales	10.42	-1	2	2	1	4	3	4	4	4	4	4	4	38
				Generación de residuos sólidos urbanos	10.42	-1	2	2	1	4	3	2	4	4	4	4	4	36
				Consumo energético	10.41	-1	2	1	1	4	3	4	4	4	4	4	4	36
	S2. Densidad de población	41.67	Demanda de viviendas	20.835	-1	4	2	2	4	4	2	4	4	4	4	8	48	
			Sobreexplotación de recursos	20.835	-1	8	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	62	

AMBIENTAL	250	S3. Cobertura de servicios de salud	41.67	Generación de residuos peligrosos (biológico infecciosos)	41.67	-1	2	2	1	4	3	2	4	4	4	3	35	
		S4. Índice de Servicios Urbanos	41.67	Consumo de agua	13.89	-1	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	39
				Generación de aguas residuales	13.89	-1	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	39
				Consumo energético	13.89	-1	2	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	37
		S5. Índice de Viviendas Sustentables	41.66	Generación de energía renovable	10.415	1	4	2	3	3	4	4	4	4	4	4	1	43
				Reducción de consumo de gas	10.415	1	4	2	3	3	4	4	4	4	4	4	1	43
				Separación de residuos	10.415	1	4	2	3	3	4	4	4	4	4	4	1	43
				Reducción de consumo de energía	10.415	1	4	2	3	3	4	4	4	4	4	4	1	43
		S6. Cobertura de Educación	41.66	Generación de residuos sólidos urbanos	10.415	-1	2	2	2	3	3	2	4	4	2	3	33	
				Consumo energético	10.415	-1	2	1	2	3	3	2	4	4	2	3	31	
				Generación de aguas residuales	10.415	-1	2	2	2	3	3	2	4	4	2	3	33	
				Demanda de infraestructura	10.415	-1	4	2	2	3	3	2	4	4	2	3	39	
		A1. Prevalencia de superficie de ANP	31.3	Mantiene flora endémica	6.26	1	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	43
				Mantiene fauna endémica	6.26	1	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	43
				Mantiene paisajes naturales	6.26	1	4	2	1	4	4	4	4	4	4	4	4	45
				Función de recreación	6.26	1	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	43
				Oportunidades de investigación científica	6.26	1	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	49
		A2. Reducción de áreas verdes	31.3	Incremento de contaminación atmosférica	10.44	-1	12	8	4	2	2	2	4	4	4	2	76	
				Pérdida de áreas recreativas	10.43	-1	8	4	4	2	2	2	4	4	4	3	57	
				Aumento de temperatura	10.43	-1	4	1	4	2	2	2	4	4	4	4	40	
A3. Reducción de superficie forestal	31.3	Aumento de erosión de suelo	10.44	-1	4	2	3	4	3	4	4	4	2	4	44			
		Incremento de contaminación atmosférica	10.43	-1	12	8	4	3	3	4	4	4	2	1	77			
		Pérdida de biodiversidad	10.43	-1	12	2	3	4	3	4	4	4	2	4	68			
A4. Ausencia de COA's	31.3	Contaminación atmosférica no registrada	31.3	-1	12	8	4	4	4	1	4	4	2	8	83			
A5. Ausencia del Derecho al agua por volumen	31.3	Sobreexplotación de recursos hídricos	31.3	-1	8	4	1	4	3	1	4	4	4	4	57			
A6. Cumplimiento del Derecho al agua por precio	31.3	Abastecimiento de recursos hídricos	31.3	1	4	4	1	4	3	1	4	4	4	3	44			
	31.3	Ruido	15.65	-1	2	1	4	3	3	2	1	4	1	1	27			

		A7. Incremento en emisión de CO <sub>2</sub> por flota vehicular		Contaminación atmosférica	15.65	-1	12	8	4	3	4	4	4	4	4	1	80
		A8. Reducción en la generación per cápita de residuos	31.3	Reducción en la generación de residuos sólidos urbanos	31.3	-1	4	4	2	3	3	2	4	4	4	3	45
<b>ECONÓMICO</b>	250	E1. Incremento del VAB	62.5	Incremento de Huella Ecológica	62.5	-1	8	8	2	4	3	4	4	4	4	4	69
		E2. Incremento de UE	62.5	Generación de residuos sólidos urbanos	31.25	-1	2	2	2	4	3	2	4	4	4	4	37
				Generación de residuos peligrosos	31.25	-1	4	4	2	4	3	2	4	4	4	3	46
		E3. Incremento de Utilidad	62.5	Incremento del bienestar social	62.5	1	8	8	2	3	3	4	4	4	2	4	66
		E4. Desempleo	62.5	Desempleo	62.5	-1	8	4	2	2	2	1	1	4	2	2	48
<b>MINERO-JALES</b>	250	M1. Incremento de concesiones minerías	50	Perdida de suelo natural	50	-1	8	4	1	4	3	4	4	4	4	4	60
		M2. Urbanización de jales	50	Contención de contaminantes	50	1	8	8	2	4	4	1	4	4	4	8	71
		M3. Reducción de UE minerías	50	Menor demanda de agua en sector minero	25	1	8	4	1	3	3	2	4	4	2	3	54
				Menor demanda de energía en sector minero	25	1	8	4	1	3	3	2	4	4	2	3	54
		M4. Desempleo minero	50	Desempleo	50	-1	4	2	3	3	3	1	1	4	2	2	35
		M5. Reducción de Utilidad minera	50	Menor demanda de agua en sector minero	25	1	8	4	1	3	3	2	4	4	2	3	54
				Menor demanda de energía en sector minero	25	1	8	4	1	3	3	2	4	4	2	3	54
1000	1000.4	1000.4	(-) 31.77														
Niveles de importancia: Amarillo: moderado; Naranja: severo; Rojo: crítico; Verde: compatible.																	
Fuente: elaboración propia																	

La mayoría de los impactos evaluados muestra un nivel moderado. Al promediar la importancia de los impactos negativos, la evaluación final de impacto ambiental muestra un nivel moderado.

#### 5.4.ALTERNATIVAS PARA UN MANEJO SUSTENTABLE DE JALES (OBJETIVO 4)

La gestión de los residuos peligrosos y la persistencia de sitios contaminados son desafíos multifactoriales que no han logrado un sistema que brinde soluciones que incorporen a todas las partes afectadas. Generalmente este paradigma se atribuye a la falta de colaboración entre gobierno, industria, comunidad afectada, científicos, propietarios de sitios, entre otras partes interesadas. Factores del ámbito social como las incertidumbres de la participación pública en la toma de decisiones de carácter ambiental, la colaboración (o su falta) de las partes interesadas y/o afectadas y la comunicación del riesgo incrementan su complejidad para la cual la mayoría de los científicos ambientales no han sido capacitados para manejar (Ramirez-Andreotta et al., 2014).

En el caso de la minería, es un uso temporal de terrenos, mismos que deben ser devueltos satisfactoriamente. Esto debido que a largo plazo los terrenos contaminados pueden evolucionar en la sucesión ecológica o aumentar su deterioro, causando problemas ambientales y sociales (Arranz et al., 2019). **La reutilización de los jales mineros inertes tiene el potencial de brindar la oportunidad de rehabilitar sitios históricamente ocupados por jales mineros** (Franks et al., 2011). El grado de restauración de estos sitios contaminados depende en gran medida de la degradación existente, así como su almacenamiento o eliminación de EPT depende de su complejidad física y química (Bridge, 2000).

En diferentes países se ha implementado la rehabilitación de áreas degradadas por Pasivos Ambientales Mineros como un instrumento de Política Ambiental (Milián-Milián et al., 2012). Esto ha originado diversas estrategias para garantizar un manejo adecuado de los jales mineros:

- En Queensland, Australia, el Departamento de Medio Ambiente y Protección del Patrimonio establece los requisitos de rehabilitación para proyectos mineros (EM1122), que dictamina cuatro objetivos específicos: la tierra no debe ser contaminante, segura, estable y capaz de soportar el uso acordado (Everingham et al., 2018).

- EU cuenta con la Ley de Control y Recuperación de la Minería a Cielo Abierto (Surface Mining Control and Reclamation Act) de 1977, establece que la vegetación removida de suelos minados debe restablecerse hasta el punto de ser autosostenible (Shrestha & Lal, 2006). Siguiendo esta ley se han realizado restauraciones de sitios mineros para uso recreativo y construcción de viviendas (Sutherland, 2015).
- Europa implementa una clasificación de brownfields basándose en su estado económico (valor del terreno después de la rehabilitación y recuperación) y el impulso que tenga el financiamiento para regenerar terrenos abandonados (Días et al., 2013).

Actualmente existen diversas alternativas para remediar suelos contaminados por jales mineros y darles uso final; en ocasiones son adecuados para ser utilizados como material de construcción (MMSD, 2002). La elección de la técnica a implementar depende de diversas variables como: el tipo de explotación y características específicas; el entorno medio ambiental y socioeconómico de la explotación y el inmediatamente próximo; el tipo de uso de suelo definido, incluyendo sus usos anteriores a la explotación; los intereses de las entidades locales y sus vecinos; la sostenibilidad en el tiempo de la actuación de rehabilitación; los costos derivados de los aspectos anteriores (Milián-Milián et al., 2012).

Las consecuencias de la permanencia de jales mineros se analizan en función del tiempo de exposición y vulnerabilidad de la población receptora. Dados estos parámetros se establecen, inicialmente medidas preventivas como la prohibición de actividades; impedir el acceso, carteles de advertencia, cercamientos, bloqueos de caminos y propuestas de cambio de uso de suelo (Arranz et al., 2019).

#### **5.4.1. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN**

Mediante la revisión sistemática implementada se detectaron diversas técnicas de remediación que pueden aplicarse a los jales mineros.

Algunas estrategias sostenibles han sido la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas (biosólidos, compost, cenizas volantes, biocarbón), uso de material nanomejorado (óxidos de hierro y nanopartículas de sulfuro de hierro), aplicar suelos no contaminados, aplicación de material de revestimiento y aislamiento mediante almacenamiento en embalses bajo el agua

o detrás de las presas, la rehabilitación del sitio usando residuos biológicos (biosólidos) (Wijesekara et al., 2016).

#### **5.4.1.1.SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SUCESIVA DE ALCALINIDAD**

Comúnmente estos sistemas son utilizados en la neutralización de drenaje ácido y eliminación de metales pesados. Este diseño combina el drenaje anóxico carbonatado con humedales anaerobios, colocando una capa de caliza sobre una capa de materia orgánica y sobre ambas el agua a tratar. La capa orgánica contiene bacterias que eliminan el oxígeno disuelto del agua, posteriormente otra capa anaeróbica con bacterias sulforreductoras producen alcalinidad carbonatada y el consiguiente incremento del pH. Finalmente, el agua tratada se decanta en una balsa de decantación, donde en contacto con el oxígeno atmosférico promueve la oxidación y subsiguiente la precipitación de metales, o en segundo sistema de tratamiento. Es un sistema continuo de alcalinidad (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013, Denegri-Muñoz & Iannacone, 2020).

**Ventajas.** El agua implementada mantiene contacto con la capa carbonatada como con la capa orgánica, permitiendo la eliminación de metales pesados. No considera la cantidad de oxígeno disuelto u otros metales en el agua a tratar (Milián-Milián et al., 2012, Denegri-Muñoz & Iannacone, 2020).

**Desventajas.** Tiene necesidad de combinarse con otras técnicas para la eliminación total de metales pesados. Su proceso es lento. Requiere extensas áreas de tratamiento, lo que genera altos costos. Su eficacia se ve afectada por las variaciones climáticas (Milián-Milián et al., 2012, Denegri-Muñoz & Iannacone, 2020).

#### **5.4.1.2.SISTEMA DE TRATAMIENTO CON COBERTURA SECA (BARRERA CAPILAR)**

Tiene la función de aislar el material sulfuroso del oxígeno e impedir la formación del drenaje ácido. Se constituye de capas superpuestas de suelos y material alternativo, cuya función es el transporte de oxígeno como barrera hidráulica. Se conforma de una capa de material arcilloso sobre una de material granular (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** Interrumpe el transporte de material soluble ya oxidado, evita la generación de aguas ácidas (Milián-Milián et al., 2012).

**Desventajas.** El volumen del material de suelo a emplear aumenta con la extensión superficial del área a impermeabilizar. Requiere que los factores climáticos, topográficos, hidrológicos, ambientales y económicos no favorezcan la inundación del área de disposición de residuos para solucionar la generación del drenaje ácido (Milián-Milián et al., 2012).

#### **5.4.1.3.SISTEMA DE TRATAMIENTO CON COBERTURA SECA (BARRERA HIDRÁULICA)**

Su función es reducir el volumen de percolado con el fin de limitar la infiltración que atraviesa a la zona oxidada del interior de la pila de residuos. Una barrera de arcilla impide el flujo de agua en el interior de los depósitos (Bichara, 2013).

**Ventajas.** Puede implementarse con una gran cantidad de productos que generan reacción de oxidación y ácido (Bichara, 2013).

**Desventajas.** Pueden verse afectadas por las condiciones climáticas (Fourie & Tibbett, 2007).

#### **5.4.1.4.MINERÍA DE TRANSFERENCIA**

Se conoce internacionalmente como STRIPPING, es un tipo de minería a cielo abierto. Consiste en la explotación minera desde la capa superficial del suelo con una longitud de fondo lo suficiente para iniciar el proceso de relleno (Albéniz, 1993, Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** Reducción de la distancia de transportación. Disminución del impacto ambiental debido a que se ocupa un área pequeña para reubicar la escombrera exterior. Rehabilitación de los terrenos afectados simultáneamente con la explotación (Albéniz, 1993, Milián-Milián et al., 2012).

**Desventajas.** Limitada profundidad de los yacimientos hasta doscientos metros. Las capas deben ser horizontales o sub-horizontales (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

#### **5.4.1.5.ZANJAS DE CORONACIÓN O CANALES COLECTORES (DRENAJE SUPERFICIAL)**

Disminuyen la infiltración de agua en las áreas superiores del talud. Se utilizan para interceptar y conducir las aguas pluviales y evitan su paso por el talud (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** Intercepta y conduce adecuadamente las aguas de lluvias. Protegen el talud (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Desventajas.** Con el tiempo hay riesgo de que se produzcan movimientos en el terreno que causan grietas, infiltraciones que conllevan a una disminución de la resistencia del suelo y por lo tanto deslizamientos (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

#### **5.4.1.6.CANALES CONECTORES EN ESPINA DE PESCADO (DRENAJE SUPERFICIAL)**

Su función se basa en la construcción de canales que conducen el agua por la vía más directa hacia afuera de las áreas vulnerables del talud (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** Disminuye la infiltración de agua en las áreas vulnerables del talud (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Desventajas.** El material impermeabilizante debe ser revisado periódicamente para evitar infiltraciones (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

#### **5.4.1.7.TANQUES REACTIVOS**

Consiste en tanques de metal o cemento, rellenos con carbonato molido. El agua por tratar se desvía mediante tubería de conducción hacia un tubo vertical abierto situado en el interior del tanque. El agua se descarga dentro del tanque y genera una turbulencia que favorece la reacción con el carbonato y produce la neutralización del agua. El agua tratada se devuelve al cauce inicial por un sistema de conducción (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** El agua contaminada crea una turbulencia que favorece su contacto y reacción con los granos de carbonato, esto produce neutralización de aguas ácidas, lo que favorece la precipitación de metales pesados (Milián-Milián et al., 2012).

**Desventajas.** El relleno ha de ser remplazado periódicamente para asegurar un tratamiento efectivo (Milián-Milián et al., 2012).

#### **5.4.1.8.FITORREMEDIACIÓN (BIORREMEDIACIÓN)**

Las técnicas de biorremediación consisten en el uso de microorganismos y/o plantas (perennes) para eliminar y/o estabilizar sustancias contaminantes (Davies & Mundalamo, 2010, Montijo et al., 2020). Consiste en el uso de plantas con capacidad de transformar, degradar, absorber, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, materiales radioactivos e hidrocarburos en sustancias menos tóxicas. Con el paso del tiempo, se ha observado que diversas especies plantas pueden sobrevivir a las condiciones extremas que se presentan en los jales mineros (pH ácido, alta biodisponibilidad de metales pesados y falta de nutrientes). Esto ha permitido identificar y elaborar listas de plantas capaces de soportar las condiciones que se presentan en los depósitos de residuos mineros con la finalidad de crear una cubierta vegetal autosostenible. Es recomendable la identificación de plantas indígenas que puedan tolerar las condiciones ambientales (Thangavel et al., 2018, Duarte-Zaragoza et al., 2019). Abarca la fitoestabilización y la fitoextracción (Bolan et al., 2014).

**Ventajas.** Bajo costo económico y mínimo impacto ambiental. Proporciona materia orgánica al suelo, por lo cual son excelentes fuentes de nutrientes para suelos degradados (Shrestha & Lal, 2006, Milián-Milián et al., 2012, Duarte-Zaragoza et al., 2019, Montijo et al., 2020). Es aconsejable para entornos urbanos (Bolan et al., 2014).

**Desventajas.** Se presta poca atención a la fitorremediación para la rehabilitación de sitios mineros (Thangavel et al., 2018). Existen dudas sobre si estos mecanismos de rehabilitación son permanentes o reversibles en el tiempo, esto genera poco aporte al secuestro de C en suelo orgánico a largo plazo (Shrestha & Lal, 2006, Milián-Milián et al., 2012). Las condiciones adversas del sitio contaminado pueden dificultar la proliferación de plantas (Shrestha & Lal, 2006). Las plantas con raíz que tienden a acumular metales en su biomasa pueden transferir los desechos sus tejidos superficiales y causar efectos dañinos a la fauna que se alimenta de ellas (Lottermoser, 2011). Jales que representan alto riesgo para el medio

ambiente requieren diseños previos de cubierta vegetal para limitar la infiltración de lluvia. Requieren monitoreo a largo plazo (Davies & Mundalamo, 2010).

#### **5.4.1.9. BIOSÓLIDOS (BIORREMEDIACIÓN)**

Los biosólidos o lodos residuales, tienden a tener altas concentraciones de metales pesados (Zn, Cu, Ni y Pb). Sin embargo, factores como el proceso de generación y el tiempo de almacenamiento influyen en sus características (C, N, P, S, Si y Al) (Bolan et al., 2014, Wijesekara et al., 2016). A medida que avanza la sucesión natural, dichas tierras serán adecuadas para el establecimiento de árboles (Wijesekara et al., 2016). Convierte la materia orgánica en un producto similar al humus más estable (Peña et al., 2015).

**Ventajas.** El alto contenido de materia orgánica mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (disminución de densidad aparente y temperatura, aumento de porosidad, aumento de conductividad hidráulica, capacidad de retención de agua, aumento de infiltración, mantenimiento de la textura del suelo, reducción de erosión y sedimentación, aumento de actividad microbiana, pH, conductividad eléctrica). Es ideal para inmovilizar metales pesados. Acelera la recuperación de la capa vegetal del sitio y puede complementarse con la fitorremediación. Es una alternativa económica. Reduce volúmenes de residuos (Peña et al., 2015).

**Desventajas.** Debido a que los biosólidos tienen altas concentraciones de metales pesados esta técnica requiere tomar medidas de precaución como el control de calidad durante su generación y el monitoreo continuo (a largo plazo) después de su aplicación en la tierra para garantizar la sostenibilidad y la seguridad ambiental a largo plazo y reducir el potencial de atraer fauna nociva a la salud. Emisión de gases de efecto invernadero. Contaminantes emergentes. Tiene el potencial de contaminar cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) con exceso de N y P. Liberación de compuestos orgánicos volátiles con olor desagradable (Wijesekara et al., 2016).

#### **5.4.1.10. ESTACAS VIVAS (BIOINGENIERÍA)**

Las estacas vivas son longitudes y tallo de árboles y arbustos que se insertan en el suelo con la finalidad de que broten árboles. Estabilización de taludes por el uso combinado de la vegetación (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** Protección integral contra la erosión. Procedimiento simple, rápido y económico. Puede implementarse para complementar el uso de mantos vegetales (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Desventajas.** Influencia directa del tipo de clima predominante (Milián-Milián et al., 2012).

#### **5.4.1.11. FAJINAS VIVAS (BIOINGENIERÍA)**

Técnica similar a las estacas vivas. Son manojos de ramas que se entierran en zanjas poco profundas con la intención de que germinen, posteriormente las zanjas se rellenan con suelo, dejando una parte expuesta de la fajina. Su principal función es el control de la erosión (Bichara, 2013).

**Ventajas.** Puede implementarse en taludes muy húmedos (Bichara, 2013).

**Desventajas.** La excavación de zanjas generalmente requiere hacerse a mano. Las fajinas requieren estar adaptadas a las condiciones climáticas del sitio (Bichara, 2013).

#### **5.4.1.12. ENMIENDA ORGÁNICA E INORGÁNICA**

Un sistema de cobertura tiene la función de proteger el medio ambiente, particularmente el agua subterránea y el subsuelo de una instalación de almacenamiento de desechos (Fourie & Tibbett, 2007). Son ideales para suelos con baja fertilidad (Milián-Milián et al., 2012). En el caso de las enmiendas orgánicas, proporcionan materia orgánica al suelo, reduce sus valores de erosión. Puede emplearse para reducir la biodisponibilidad de EPT (Bichara, 2013).

**Ventajas.** El encapsulamiento garantiza estabilidad e impermeabilización. Evita efectos en aguas subterráneas (Montijo et al., 2020). Las enmiendas orgánicas disminuyen la densidad aparente del suelo, aumentan la capacidad de retención de agua, mejoran la disponibilidad de nutrientes de las plantas. Los residuos de cultivos agrícolas y de madera pueden emplearse como material de cobertura. En áreas pequeñas puede emplearse ganado por periodos cortos

de tiempo (Shrestha & Lal, 2006). Las cubiertas vegetales reducen la erosión y mejoran la calidad del suelo (Peña et al., 2015).

**Desventajas.** Debido a los altos volúmenes de suelo y material requerido resulta en una alternativa costosa (Montijo et al., 2020). Riesgos potenciales de contaminación del sistema suelo-planta por metales pesados (Shrestha & Lal, 2006).

#### **5.4.1.13.RECICLAJE**

Es la práctica que extrae nuevos recursos valiosos o utiliza los desechos como materia prima y los convierte en un nuevo producto o aplicación, después de reprocesarlos (esto incluye utilizar el material de desecho como materia prima para producir un producto valioso, como minerales y metales recuperados que pueden volverse valiosos, mientras que el tratamiento de los desechos mineros tiene como objetivo reducir la toxicidad o el volumen de los desechos). El reciclaje y la reutilización de desechos mineros depende en gran medida de sus aplicaciones y beneficios financieros; en la actualidad, la mayoría de los desechos mineros se destinan a instalaciones de almacenamiento (Lottermoser, 2011). Otro termino que puede aplicarse en esta técnica es la “minería urbana”, que se ha utilizado recientemente para describir el reciclaje o recuperación de metales presentes en los desechos (principalmente en los eléctricos) o la extracción de recursos metálicos secundarios de reservorios obsoletos, y en este sentido, ubicados dentro de territorios urbanos. Generalmente se aplica a rellenos sanitarios (Krook & Baas, 2013).

**Ventajas.** Creación de activos financieros. Puede complementarse con diversas técnicas. Ralentiza el consumo de recursos naturales. Limita la producción de desechos. Reduce la exposición a contaminantes. Fomenta la innovación en industrias locales. Creación de empleos. Fomenta la responsabilidad ambiental (Lottermoser, 2011, Krook and Baas, 2013). La aplicación de la economía circular en la minería tiene el potencial de resolver problemáticas como la escasez de minerales, el desperdicio de recursos, la contaminación ambiental, minimización de desperdicios y aportar un beneficio económico (Kinnunen & Kaksonen, 2019).

**Desventajas.** Incluso en países con sofisticados sistemas de reciclaje la capacidad de tratamiento es limitada. El reciclaje no puede reemplazar la producción primaria (Krook &

Baas, 2013). El contenido de metales y metaloides potencialmente móviles y biodisponibles en residuos piríticos limita su uso como aditivo en el suelo. La reutilización y el reciclaje de desechos de minas siguen siendo ideas que no han sido adoptadas por la industria, se han realizado pocos esfuerzos para adoptar la economía circular (Lottermoser, 2011, Krook & Baas, 2013).

#### **5.4.1.14. NEUTRALIZACIÓN CON $\text{CaO}_{(s)}$**

Se implementa en aguas ácidas provenientes de jales mineros. Su aplicación se basa en el hecho de al mezclar  $\text{CaO}_{(s)}$  con agua (lechada de cal), se forma una mezcla con propiedades neutralizantes (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Ventajas.** Bajo costo de adquisición (no para volúmenes altos), fácil de manejar, alto nivel de eficiencia y facilita la coprecipitación de metales (Milián-Milián et al., 2012, Bichara, 2013).

**Desventajas.** La reacción suele ser lenta (Milián-Milián et al., 2012). La adición de cal puede conducir a cambios en la composición del suelo con posibles implicaciones para la retención o disponibilidad de nutrientes u otros compuestos (Peña et al., 2015).

#### **5.4.2. DISCUSIÓN FINAL (OBJETIVO 4)**

Los sitios mineros seguirán causando problemáticas durante muchos años debido a la magnitud de problemas asociados (Davies & Mundalamo, 2010). La recuperación de suelos mineros es una disciplina incipiente que dará como resultado paisajes que funcionen mejor y que sean menos susceptibles a los peligros con el tiempo (Mossa & James, 2013).

Los cambios en el estilo de vida y la prosperidad económica hacen que la selección de un uso de la tierra después de la explotación minera sea una serie compleja y multifacética de decisiones que requieren la consideración de muchos factores asociados con un futuro viable para los posibles usuarios de la tierra y la comunidad afectada. Hay pocos ejemplos de toma de decisiones participativa en la planificación del uso de tierra en paisajes mineros. Una participación temprana y significativa de las partes interesadas permitirá un manejo adaptativo basado en las preferencias de la comunidad (Everingham et al., 2018).

De acuerdo con Arranz et al. (2019), la inmovilización, el lavado de suelos y la fitorremediación son las técnicas más empleadas para remediar suelos contaminados por metales pesados. Sin embargo, en la práctica se menciona que es más conveniente emplear un híbrido de dos o más técnicas. Los factores que pueden influir en su aplicabilidad son: el costo, la efectividad y permanencia a largo plazo, la disponibilidad comercial, la aceptación general, la aplicabilidad en altas concentraciones de metales, la aplicabilidad a residuos mixtos, la reducción de toxicidad, la reducción de movilidad y la reducción de volumen.

Las estrategias de gestión de residuos nacionales, regionales y mundiales deben basarse en un marco normativo y legislativo armonizado, integrado y eficaz que aborde la seguridad ambiental y la salud pública como primera prioridad y considere todas las alternativas de minimización del flujo de residuos. La propia legislación requiere ser clara, utilizar definiciones inequívocas y no permitir diferencias de interpretación o exenciones de la regla. La experiencia muestra que los productores aprovecharán cualquier brecha legislativa para evitar costos adicionales de gestión de residuos. Muy a menudo, la administración y los órganos legislativos sucumben a una presión masiva de la industria y suavizan las regulaciones (Twardowska & Lacy, 2004).

Aunque la naturaleza de la contaminación puede diferir en los sitios mineros en varios lugares a nivel mundial, se debe enmarcar un programa común para la recuperación, debido a la ausencia de un procedimiento metodológico que permita seleccionar de manera preventiva el más adecuado (Bichara, 2013, Thangavel et al., 2018).

Como una forma de valorizar (económicamente) los jales, se considera la recuperación de metales residuales y el aprovechamiento de su matriz mineral con apoyo de la gestión ambiental. Debido a que los jales ya están triturados, es posible reducir los costos de extracción y procesamiento hasta en 60% del costo total de procesamiento del mineral (Kinnunen & Kaksonen, 2019).

La recuperación de sitios contaminados por residuos mineros generalmente no restablece la topografía “original”, pero tiene como objetivo reducir los impactos fuera del sitio y promover la formación de suelos y el establecimiento de ecosistemas funcionales autosostenibles a través del manejo y control de procesos geomórficos (Mossa & James,

2013). Los procesos de rehabilitación de suelos deben considerar rehabilitar la complejidad biológica (Ohsowski et al., 2012).

Los vertederos de desechos mineros ubicados en áreas densamente pobladas se han convertido en centros de servicios sociales, como parques, campos de fútbol, campos de golf, teatros al aire libre e incluso pistas de esquí artificiales (Lottermoser, 2011). Bajo condiciones adecuadas (área y altura), se han realizado propuestas para utilizar jales mineros como bases para la construcción de fuentes alternativas de energía (eólica y solar) con la intención de convertir dichas áreas en activos potencialmente útiles, mientras se pueda garantizar la estabilidad estructural del sótano colocado sobre relaves de grano fino (Winde et al., 2017). En el caso de residuos con alta toxicidad (y volumen reducido), la única alternativa para reducir el riesgo a la población de las proximidades es establecer tanta distancia como sea posible por medio de la reubicación de los residuos. Sin embargo, en la mayoría de los casos apunta a ser una solución poco práctica debido a su costo económico (Arranz et al., 2019).

Aún con esta diversidad de alternativas para mitigar los impactos ambientales negativos originados por los jales, la legislación mexicana no establece una obligatoriedad de un manejo sustentable de los jales mineros después de la etapa de post operación.

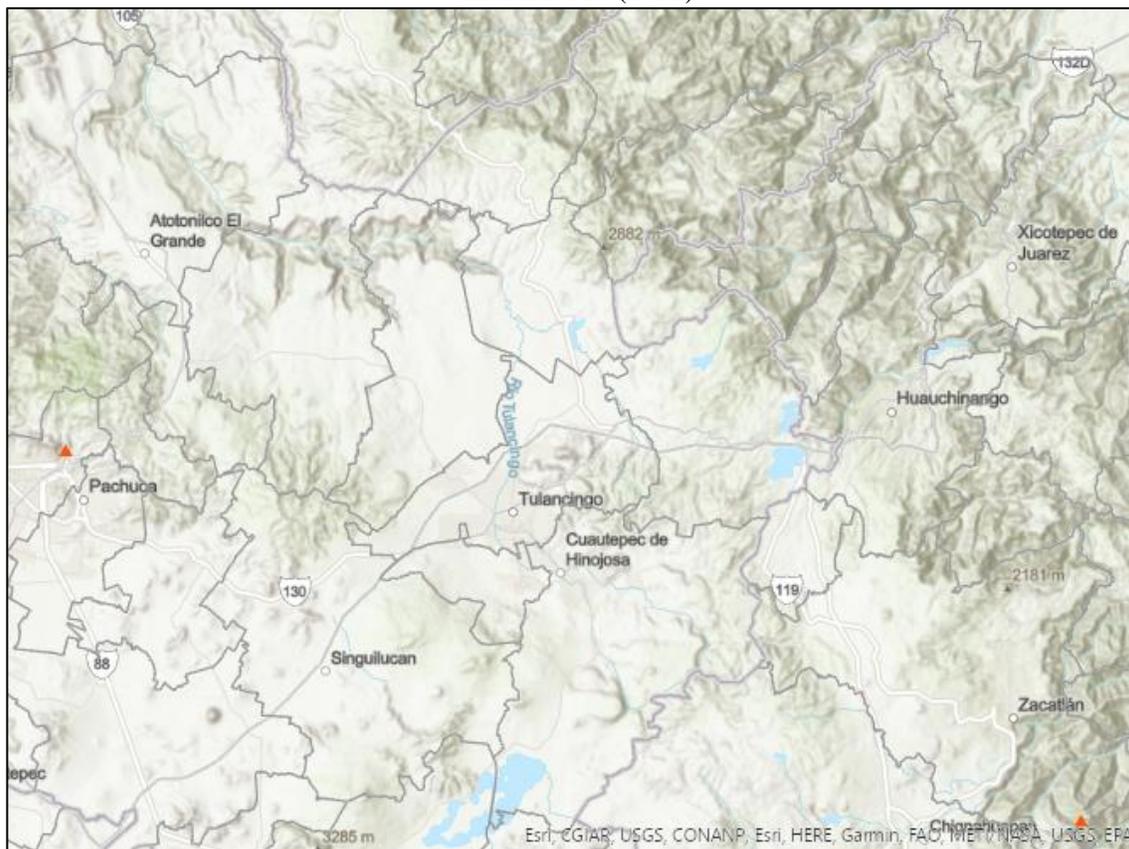
## **5.5.DISCUSIÓN**

Aún con el consenso sobre su peligrosidad, no se han presentado quejas incentivadas por la presencia de jales ante la Comisión de Derechos Humanos del Estado de Hidalgo (hasta marzo del 2020) (**Anexo D**). Por lo que la necesidad de solucionar el presente paradigma no ha alcanzado los niveles “necesarios” para estar en la agenda política. De acuerdo con el reciente Inventario Homologado Preliminar de Jales, la Comarca Minera no cuenta con ningún tipo de Pasivos Ambientales (**Ilustración 30**).

De acuerdo con las teorías sobre el riesgo, una población o grupo de individuos no perciben los riesgos a los que están expuestos hasta que comienzan a padecer los efectos negativos. Percibir el riesgo conlleva una evaluación subjetiva sobre percibir la probabilidad de sufrir algún efecto negativo ante la exposición de una fuente de riesgos (Rodríguez et al., 2015). Es entonces cuando llevan a cabo un proceso de resiliencia. Esto puede atribuirse a que el nexo jales-salud pública a la fecha es un tema poco estudiado en la Comarca Minera.

De forma complementaria, se llevaron a cabo dos entrevistas semiestructuradas a personas pertenecientes al gobierno municipal y una asociación civil. La estructura de las entrevistas se muestra en los **Anexos E y F** y la carta de consentimiento para la entrevista en el **Anexo G**.

SEMARNAT (2021)



*Ilustración 30. Vista de la Comarca Minera en el Inventario Homologado Preliminar de Jales (consultado el 2 de mayo del 2022)*

### **Gobierno Municipal**

La participación del gobierno municipal en torno a los jales y su reubicación ha sido limitada debido a que todo lo relacionado con la minería es de competencia federal. Sin embargo, a pesar de que la LGEEPA establece que la federación, entidades federativas y municipios deben ejercer de forma coordinada sus atribuciones para preservar y restaurar el equilibrio ecológico y protección ambiental, esto pocas veces se lleva a cabo. En este caso el gobierno municipal abarca la gestión de permisos para derechos de vía en el municipio, siendo que el traslado de los jales por el río Epazoyucán (utilizando un jaleoducto rehabilitado) se

considera como zona federal según la Ley de Aguas Nacionales. Únicamente se solicitó la opinión técnica, misma que puede ser o no tomada en consideración en este caso por SEMARNAT, para no hacer modificaciones en el sistema del río (de las Avenidas) y el centro histórico.

El retiro de los jales es una alternativa conveniente tanto para el desarrollo urbano de Pachuca debido al problema de salud, como para la empresa minera que promueve el proyecto, ya que es una oportunidad para recuperar el oro y la plata. Sin embargo, esto significaría llevar el problema a Epazoyucan, aunado al riesgo de dispersión de partículas en cuanto empiece el traslado. A esto hay que sumar el rechazo a proyectos científicos que promueven la reutilización de los jales para fabricar material de construcción.

Pachuca es autónomo en cuestión de urbanización desde hace 10 años aproximadamente (permisos de obra, construcción de fraccionamientos y uso de suelo), debido a que el gobierno estatal no podía darse abasto en la cobertura de este servicio. Sin embargo, los permisos para construcción de jales se emitieron antes de delegar dicha función. La ausencia en ese entonces de programas de ordenamiento ecológico y urbano permitían dar permisos de urbanización sin control alguno. Actualmente es posible limitar el crecimiento de la mancha urbana mediante la conservación ecológica.

### **Organización civil**

Una organización civil enfocada en la educación ambiental tiene el potencial de identificar los problemas ambientales y discutir sus riesgos para el medio ambiente como una forma de representar a la sociedad, empleando antecedentes científicos como base. Debido al riesgo para la salud, dicha organización ha realizado denuncias sobre los asentamientos que están sobre los jales

Tomando como referencia estudios (del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares), se ha apoyado el rechazo a la reubicación de los jales, bajo el riesgo de dispersión de contaminantes, sobre todo el drenaje ácido. Esto se vio reflejado en la sociedad por medio de suministro de información y el liderazgo de la organización para comunicar el riesgo que dicha acción representa.

Desde un punto de vista preventivo, es preferible que estos residuos sean inmovilizados *in situ*. Ya sea por medio de polímeros para aislar los jales, mismos que se han propuesto o solventar la falta de áreas verdes y a la vez mejorar la calidad del aire. Debido a la falta de crecimiento económico y desarrollo social, la urbanización no es la mejor opción, ya que la población de Hidalgo no cuenta con las condiciones para solventar una vivienda propia por lo que el uso de suelo de los jales obedecería intereses privados.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS**

1.- La actividad minera y la disposición de jales se ha reducido progresivamente en la Comarca Minera durante el periodo analizado según el análisis espacial realizado ya que los jales y sus alrededores fueron empleados como una alternativa de urbanización. Esta estrategia puede considerarse como una forma de contención para mitigar la dispersión de los Elementos Potencialmente Tóxicos contenidos en los jales, aunque se mantienen como un riesgo latente, mismo que aumenta donde el talud permanece descubierto. En los jales urbanizados incluso prevalece el riesgo de hundimiento de infraestructuras construidas sobre ellos.

2.- Los 23 indicadores de sustentabilidad seleccionados se reportan por primera vez en la Comarca Minera y permitieron proponer políticas públicas alineadas con nuevas tendencias que incluyen la gestión urbana sustentable dentro del marco normativo nacional de la minería en la zona de estudio.

2.a. Se demuestra que los jales de la comarca minera pueden continuar urbanizándose siempre que se consideren los indicadores de sustentabilidad en la planeación urbana o de uso público común.

2.b. - El Índice Urbano/Minero de Sustentabilidad calculado para la Comarca Minera resultó de nivel “MUY BAJO”, aunque se encontró falta de información. Por ello se recomienda que se unifiquen los criterios de indicadores de sustentabilidad y ponerlos a disposición pública, lo cual permitirá la desagregación de éstos del nivel estatal al municipal.

3.- La evaluación del impacto ambiental definió por primera vez los criterios de mayor importancia para los cuatro ámbitos analizados en la Comarca Minera. Los más relevantes fueron: el consumo de agua, la generación de aguas residuales, consumo energético, la generación de residuos sólidos urbanos y la contaminación atmosférica.

3.a. - La matriz CONESA muestra que los indicadores de sustentabilidad son en su mayoría moderados y por ello, esta metodología no es recomendable para el estudio de la Comarca Minera en la etapa de desarrollo urbano post minero. Sin embargo, los resultados obtenidos se recomiendan como línea base para futuras investigaciones y la matriz obtenida puede ser

ampliada a otros sectores para evaluar la interacción del desarrollo urbano sustentable con otros ámbitos.

3.b. – De acuerdo con la matriz CONESA los impactos de nivel moderado recabaron un 48.76% de las unidades de importancia, mientras que los impactos críticos alcanzaron un 44.5% y los severos un 6.78%. De los impactos severos (todos negativos) se recabaron: el incremento de contaminación atmosférica y la correspondiente no registrada. Mientras que los impactos críticos (negativos) tuvieron una mayor diversidad: sobreexplotación de recursos, pérdida de áreas recreativas, pérdida de biodiversidad, sobreexplotación de recursos hídricos, ruido, incremento de huella ecológica, pérdida de suelo natural.

4.-Los sitios con jales de la Comarca seguirán causando problemas ambientales por lo que las técnicas de revegetación con especies acumuladoras de Elementos Potencialmente Tóxicos es una alternativa recomendada.

4.a. - La revisión bibliográfica acerca de la presencia de los jales mineros en zonas urbanas muestra que es un tema continuamente abordado debido al peligro potencial, la falta de planes de urbanización y la ausencia de exigencia legal para solucionarlo. Generalmente se recomienda la implementación de varias técnicas para minimizar el impacto de los residuos mineros en zonas urbanas. Se reportan pocas recomendaciones sobre la gestión de estos residuos y sus contaminantes. En la actualidad prevalece la alternativa de retirar los jales de la Comarca Minera para seguir urbanizando y posteriormente realizar un último aprovechamiento de trazas de minerales.

## **6.2.RECOMENDACIONES GENERALES**

La recuperación de los terrenos post mineros (brownfields) en la Comarca Minera es una oportunidad para llevar a cabo un manejo sustentable de residuos mineros y así promover una economía circular. Los jales representan la oportunidad de implementar las medidas de rehabilitación o mitigación por medio de la implementación de materia orgánica o la fabricación de material de construcción.

Dada la tendencia de urbanizar mediante la construcción de fraccionamientos privados (situación que solo beneficia a una minoría capaz de adquirir dichas propiedades) se recomienda enfocar o complementar dicho proceso al bien común con la finalidad de brindar

servicios a la sociedad. La creciente ausencia de áreas verdes, especialmente las destinadas a la recreación, puede mitigarse si se opta por implementar técnicas de revegetación, a la vez esto evitaría la dispersión de los Elementos Potencialmente Tóxicos y mitigaría la emisión de los gases de efecto invernadero. Esto último, aunado a la selección de especies vegetales acumuladores de Elementos Potencialmente Tóxicos, puede considerarse como una solución a largo plazo.

Dicha investigación muestra la necesidad de unificar los indicadores con la finalidad de permitir su desagregación en los distintos niveles. Con ello, es posible tener la disponibilidad de datos cuantitativos indispensables para la toma de decisiones en cuestión de políticas públicas.

Dados los beneficios que otorga la legislación mexicana al sector minero, es necesario reglamentar en futuras actualizaciones la responsabilidad por los residuos mineros y otorgarles un manejo sustentable que se vea reflejado en el bien común.

# ANEXOS

## ANEXO A

SE (2022)



Marco legal de la minería mexicana

## ANEXO B

Referencias incluidas en la metodología PRISMA

### Anexo B.1. Referencias incluidas con metodología PRISMA

N°	Referencia (PRISMA)	Clasificación
1	(Bridge, 2000)	A
2	(Twardowska & Lacy, 2004)	CL
3	(Shrestha & Lal, 2006)	A
4	(Davies & Mundalamo, 2010)	A
5	(Ohsowski et al., 2012)	A
6	(Dias et al., 2013)	A
7	(Krook & Baas, 2013)	A
8	(Mossa & James, 2013)	CL
9	(Bolan et al, 2014)	A
10	(Ramirez-Andreotta et al., 2014)	A
11	(Peña et al., 2015)	A
12	(Sutherland, 2015)	A
13	(Wijesekara et al, 2016)	CL
14	(Winde et al., 2017)	A
15	(Everingham et al., 2018)	A
16	(Thangavel et al, 2018)	CL
A: artículo; L: libro; CL: capítulo de libro; I: informe.		
Fuente: elaboración propia		

### Anexo B.2. Referencias incluidas (elaboración propia).

N°	Referencia (referencias dirigidas)	Clasificación
1	(Albéniz, 1993)	A
2	(MMSD, 2002)	I
3	(Fourie & Tibbett, 2007)	A
4	(Franks et al, 2011)	A
5	(Lottermoser, 2011)	A
6	(Wuana & Okieimen, 2011)	A
7	(Milián-Milián et al, 2012)	A
8	(Bichara, 2013)	I
9	(Arranz et al, 2019)	L
10	(Duarte-Zaragoza et al., 2019)	A
11	(Denegri-Muñoz & Iannacone, 2020)	A
12	(Montijo et al, 2020)	CL
A: artículo; L: libro; CL: capítulo de libro; I: informe.		
Fuente: elaboración propia		

## ANEXO C

La información completa empleada en la elaboración de indicadores puede consultarse en el siguiente enlace:

[https://drive.google.com/file/d/10Cv7vsGDyBSePjA0wlrTFvs7R7Y5Eby-/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/10Cv7vsGDyBSePjA0wlrTFvs7R7Y5Eby-/view?usp=share_link)

## ANEXO D

Comisión de Derechos Humanos del Estado de Hidalgo



Solicitud folio: 0120

Pachuca de Soto; Hidalgo, 26 de marzo de 2020.

C. Abraham Camacho Garza.  
**PRESENTE**

Con relación a su solicitud recibida vía la Plataforma Nacional de Transparencia, por la Unidad de Transparencia de la Comisión de Derechos Humanos del Estado de Hidalgo, el día 27 de febrero de 2020, a las 09:00 horas, con folio número 00039520; y con fundamento en los artículos: 5, 7, 8, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 119, 120, 124, 125, 127 y 129 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública para el Estado de Hidalgo; esta Unidad de Transparencia da respuesta conforme a la información proporcionada por la Dirección General de Administración y Finanzas encargada del área de Estadística:

**Pregunta:**

- *Número de reclamos del Derecho al medio ambiente; número total, clasificación y resolución, en el Estado de Hidalgo.*
- *Número de reclamos del Derecho al medio ambiente relacionados a los jales mineros del Estado de Hidalgo; número total, número por municipio, clasificación y resolución.*

**Respuesta:**

Estableciendo los criterios de búsqueda de la solicitud ingresada a esta Comisión, se envía en archivo adjunto y debidamente desglosada la información localizada en el Sistema Informático de la CDHEH, que comprende desde 2003 a la fecha, cabe hacer mención que no se localizó en dicha base de datos quejas relacionadas a los Jales del Estado de Hidalgo.

Gracias por ejercer su derecho de acceso a la información, esta Unidad de Transparencia se encuentra a sus órdenes.

**ATENTAMENTE**  
Gerardo Delgado Figueroa  
Titular de la Unidad de Transparencia

Respuesta de solicitud de información ante la Comisión de Derechos Humanos del Estado de Hidalgo.

## ANEXO E

### Esquema de entrevista semiestructurada a actor de organización civil

N°	Etapa
1	Introducción <ul style="list-style-type: none"> <li>• Información sobre organización</li> <li>• Antecedentes</li> </ul>
2	Jales y su riesgo ecotoxicológico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerando su contenido de metales pesados ¿podrían considerarse los jales como un riesgo a la salud humana?</li> <li>• ¿Los jales representan un riesgo para la calidad del medio ambiente?</li> </ul>
3	Conflictos socioambientales <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyecto Pachuca y las manifestaciones que se han generado.</li> <li>• ¿De qué manera han participado?</li> <li>• ¿Cuáles son las expectativas al evitar la movilización de los jales?</li> </ul>
4	Planes a futuro <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué estrategias considera serían las ideales para llevar a cabo un manejo sustentable?</li> <li>• ¿Han trabajado con otros sectores para atender el problema?</li> <li>• ¿Han tenido contacto con las empresas mineras?</li> </ul>
5	¿Cuál sería el escenario ideal en esta situación?
Fuente: elaboración propia	

## ANEXO F

### Esquema de entrevista semiestructurada a actor de gobierno municipal

N°	Etapa
1	Introducción <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comentarios sobre los jales</li> <li>• Normalización de los jales en la zona urbana</li> </ul>
2	Jales vs. Desarrollo Urbano Sustentable <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué problemáticas han causado los jales en la Zona Metropolitana de Pachuca? / Impactos ambientales de los jales</li> <li>• ¿Cuáles han sido las quejas más recurrentes de la sociedad?</li> <li>• Proyecto Pachuca y las manifestaciones que se han generado</li> </ul>
3	Riesgo ecotoxicológico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerando su contenido de metales pesados ¿podrían considerarse los jales como un riesgo a la salud humana?</li> <li>• ¿Los jales representan un riesgo para la calidad del medio ambiente?</li> <li>• ¿Qué medidas han tomado o pretenden tomar?</li> </ul>
4	Planes a futuro <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué estrategias han contemplado para llevar a cabo un manejo sustentable?</li> <li>• ¿Han trabajado con gobierno federal o estatal para atender el problema?</li> <li>• ¿Han trabajado de manera coordinada con las empresas mineras</li> </ul>
5	¿Una vez que se hayan retirado los jales mineros cuál cree que sería el uso de ese espacio liberado?
Fuente: elaboración propia	

## ANEXO G

Elaboración propia



### CARTA DE CONSENTIMIENTO

Fecha: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Por medio del presente, reitero y autorizó que toda información mencionada en la entrevista/junta/sesión informativa realizada con el **M.A.I.A. Abraham Camacho Garza**, quien es alumno del Doctorado en Ciencias Ambientales (modalidad tradicional) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, con número de control **415664**, sea utilizada únicamente para fines académicos, entre ellos, el cumplimiento de los objetivos de su respectiva tesis cuyo título actual es "Evaluación de los indicadores de sustentabilidad en los jales minero de Pachuca de Soto, Hidalgo".

---

Nombre y firma

Formato de carta de consentimiento para entrevista

## REFERENCIAS

- ADIANSYAH, J. S., ROSANO, M., VINK, S. & KEIR, G. 2015. A framework for sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050-1062.
- ALBÉNIZ, M. A. 1993. Perspectiva de la minería del carbon en Teruel. *Cuadernos de Geología Ibérica= Journal of iberian geology: an international publication of earth sciences*, 39-56.
- ALKER, S., JOY, V., PETER, R. & NATHAN, S. 2000. The Definition of Brownfield. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43, 49-69.
- ALLEN, A. 2009. Sustainable cities or sustainable urbanisation. *University College London Journal of Sustainable Cities Summer*, 1, 1-3.
- AMBROCIO, E. D. L. L. 2017. *Uso de residuos mineros como relleno en minas subterráneas y criterios para un marco regulatorio*. UNAM.
- ARMENDÁRIZ, E. J. 2016. *Áreas naturales protegidas y minería en México: perspectivas y recomendaciones*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
- ARRANZ, J. C., RODRÍGUEZ, V., RODRÍGUEZ, R., FERNÁNDEZ, F. J., VADILLO, L. & ALBERRUCHE, E. 2019. *Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros*, Madrid, Gobierno de España. Ministerio para la transición ecológica.
- BADERA, J. 2015. Problems of the social non-acceptance of mining projects with particular emphasis on the European Union - a literature review. *Environmental & Socio-economic Studies*, 2, 27-34.
- BELLE, G., FOSSEY, A., ESTERHUIZEN, L. & MOODLEY, R. 2021. Contamination of groundwater by potential harmful elements from gold mine tailings and the implications to human health: A case study in Welkom and Virginia, Free State Province, South Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 12.
- BICHARA, E. 2013. *Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el proceso de rehabilitación minera*. ISMMM.
- BOLAN, N., KUNHIKRISHNAN, A., THANGARAJAN, R., KUMPIENE, J., PARK, J., MAKINO, T., KIRKHAM, M. B. & SCHECKEL, K. 2014. Remediation of heavy metal(oid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? *Journal of Hazardous Materials*, 266, 141-166.
- BRIDGE, G. 2000. The social regulation of resource access and environmental impact production, nature and contradiction in the US copper industry. *Geoforum*, 31, 237-256.
- BRYANT, R. A. L. & WILSON, G., A. 1998. Rethinking environmental management. *Progress in Human Geography*, 22, 321-343.
- CAASIM. 2022. *Tarifas* [Online]. Available: <http://caasim.hidalgo.gob.mx/pag/tarifas.html> [Accessed 1 de mayo 2022].
- CABRERA-CRUZ, R, GORDILLO-MARTÍNEZ, A. & CERÓN-BELTRÁN, Á. 2003. Inventario de contaminación emitida a suelo, agua y aire en 14 municipios del estado de Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19, 1171-181.
- CAMACHO-GARZA, A., ACEVEDO-SANDOVAL, O. A., OTAZO-SÁNCHEZ, E. M., ROMAN-GUTIÉRREZ, A. D. & PRIETO-GARCÍA, F. 2022. Human Rights and Socio-Environmental Conflicts of Mining in Mexico: A Systematic Review. *Sustainability*, 14.
- CAMARRILLA, A. S. 2014. *Tolerancia a metales pesados y oxianiones de plantas que crecen en el suelo contaminado con jales en Zimapán, Hidalgo*. Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana.
- CAMARRILLO, A. S. 2014. *Tolerancia a metales pesados y oxianiones de plantas que crecen en suelo contaminado con jales en Zimapán*. Azcapotzalgo: Universidad Autónoma Metropolitana.

- CANET, C., MORA-CHAPARRO, J. C., IGLESIAS, A., CRUZ-PÉREZ, M. A., SALGADO-MARTÍNEZ, E., ZAMUDIO-ÁNGELES, D., FITZ-DÍAZ, E., MARTÍNEZ-SERRANO, R. G., GIL-RÍOS, A. & POCH, J. 2017. Cartografía geológica para la gestión del geopatrimonio y la planeación de rutasgeoturísticas: Aplicación en el Geoparque Mundial de la UNESCOComarca Minera, Hidalgo. *terra digitalis, international e-journal of maps*, 1, 1-7.
- CARMONA-GARCÍA, U., CARDONA-TRUJILLO, H. & RESTREPO-TARQUINO, I. 2017. Gestión ambiental, sostenibilidad y competitividad minera. Contextualización de la situación y retos de un enfoque a través del análisis del ciclo de vida. *Dyna*, 84, 50-58.
- CARTOMINMEX. 2022. *Cartografía minera* [Online]. Available: <https://portalags1.economia.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=1f22ba130b0e40d888bfc3b7fb5d3b1b> [Accessed].
- CARVALHO, F. P. 2017. Mining industry and sustainable development: time for change. *Food and Energy Security*, 6, 61-77.
- CASTRO, M. 2002. *Indicadores de desarrollo sostenible urbano. Una aplicación para Andalucía*. Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. .
- CEBALLOS, S. G. & PIÑA, G. 2017. Indicadores urbano ambientales de la zona metropolitana de Pachuca, Hidalgo. *Congreso de Observatorios Urbanos y Desarrollo*.
- CHEN, J., ZHOU, C. & LI, F. 2020. Quantifying the green view indicator for assessing urban greening quality: An analysis based on Internet-crawling street view data. *Ecological Indicators*, 113.
- CONAGUA. 2022. *Registro Público de Derechos de Agua* [Online]. Available: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx> [Accessed].
- CONASAMI. 2021. *Evolución del salario mínimo* [Online]. Available: <https://www.gob.mx/conasami/documentos/evolucion-del-salario-minimo?idiom=es> [Accessed].
- CONESA, V. 1997. *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, Madrid, Mundi-Prensa Libros.
- CONESA, V. 2000. *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, Madrid, Mundi-Prensa Libros.
- CONTRERAS, C. 2016. *Obliopatías: recuperación del espacio abierto contaminado en asentamientos humanos ubicados sobre depósitos de jales mineros*. UNAM.
- CONTRERAS, C., HERNÁNDEZ, J., CERECEDO, E., MERCADER, M. & LÓPEZ, I. R. 2019. Caracterización del suelo de un desarrollo habitacional sobre residuos mineros de Pachuca de Soto, Hidalgo. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingeniería del ICBI*, 7, 67-75.
- CONTRERAS, C. & LÓPEZ, R. Desarrollo de la vegetación en suelos de jales mineros para la recuperación de las áreas verdes en espacios abiertos contaminados. Proceedings of the II International congress on sustainable construction and eco-efficient solutions, 25-27 de Mayo 2015. Sevilla, 946-957.
- COTÁN-PINTO, S. 2007. Valoración de impactos ambientales. Sevilla: INERCO.
- CRAVIOTO, F. 2019. La Normatividad Minera en México: problemas y propuestas de modificación. CCMSS.
- CRONJÉ, F. & CHENGA, C. S. 2009. Sustainable social development in the South African mining sector. *Development Southern Africa*, 26, 413-427.
- CRONJE, F., REYNEKE, S. & VAN WYK, D. 2013. Local communities and health disaster management in the mining sector. *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 5.
- CRUZADO-TAFUR, E., TORRÓ, L., BIERLA, K., SZPUNAR, J. & TAULER, E. 2021. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 106.

- DAVIES, T. C. & MUNDALAMO, H. R. 2010. Environmental health impacts of dispersed mineralization in South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 58, 652-666.
- DENEGRI-MUÑOZ, J. E. & IANACONE 2020. Tratamiento de drenaje ácido de minas mediante humedales artificiales. *Biotempo*, 17, 345-369.
- DI PACE, M. 2001. Sustentabilidad urbana y desarrollo local. San Miguel: Instituto del Conurbano, Universidad Nacional de General Sarmiento.
- DIAS, I., CRAVEIRO, D. & SÉRGIO, M. 2013. A sustainability framework for redevelopment of rural brownfields: stakeholder participation at SÃO DOMINGOS mine, Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 57, 200-208.
- DÍAZ ÁLVAREZ, C. J. 2014. Metabolismo Urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina*, 2, 51-70.
- DOLD, B. 2008. Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7, 275-285.
- DOMÍNGUEZ, C. 2016. *Hacia la reintegración funcional de brownfields como estrategia de desarrollo sostenible en la ciudad de Tijuana, Baja California, México*. Colef.
- DUARTE-ZARAGOZA, V. M., LOZANO-CAMARGO, M. L. & VEGA-LOYOLA, M. 2019. Implicaciones ambientales y restauración de las presas de jales de la minería metálica. *Ecorfan*, 32-44.
- EJA. 2020. *Proyecto Pachuca y jales mineros tóxicos en Epazoyucan, Hidalgo, México* [Online]. Available: <https://ejatlas.org/conflict/proyecto-pachuca-reproceso-produccion-y-deposito-de-jales-mineros-altamente-toxicos-en-epazoyucan-hidalgo-mexico> [Accessed 28 de agosto 2022].
- ELI 2000. Prevención de la contaminación minera: propuesta de un marco común para las Américas. Washington: USAID, Environmental Law Institute.
- ESCALONA, C. P. 2017. La vulnerabilidad social urbana en el municipio de Pachuca de Soto. *Estudio de los problemas y realidad urbana actual en México*. Pachuca de Soto: El Colegio del Estado de Hidalgo.
- ESCOBAR, L. 2006. Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *EURE*, XXXII, 73-98.
- EVERINGHAM, J.-A., ROLFE, J., LECHNER, A. M., KINNEAR, S. & AKBAR, D. 2018. A proposal for engaging a stakeholder panel in planning post-mining land uses in Australia's coal-rich tropical savannahs. *Land Use Policy*, 79.
- FLORES, J. 2017. *Recuperación de sílice a partir de los jales del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, en el Estado de Hidalgo y su utilización como material de construcción*. Doctor, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- FONTÚRBEL, F. E., BARBIERI, E., HERBAS, C., BARBIERI, F. L. & GARDON, J. 2011. Indoor metallic pollution related to mining activity in the Bolivian Altiplano. *Environmental Pollution*, 159, 2870-2875.
- FOURIE, A. B. & TIBBETT, M. 2007. Post-Mining Landforms-Engineering a Biological System. *Mine Closure*, 3-12.
- FRANKS, D., BOGER, C., CÔTE, C. & MULLIGAN, D. 2011. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*, 36, 114-122.
- FRANKS, D. M. 2015. *Mountain movers: Mining, sustainability and the agents of change*, Taylor and Francis.
- FUNDAR 2002. *Minería, comunidades y medio ambiente. Investigaciones sobre el impacto de la inversión canadiense en México*, Cd. de México, FUNDAR.
- GARCÍA-BENÍTEZ, M., FRANCO-SÁNCHEZ, L. M. & GRANADOS-ALCANTAR, J. A. 2019. Evaluación del crecimiento de la población y transformación del uso de suelo urbano en la Zona Metropolitana de Pachuca, México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 21, 63-81.

- GARCÍA NAVARRO, J., MAESTRO MARTÍNEZ, L., HUETE FUERTES, R. & GARCÍA MARTÍNEZ, A. 2009. Settings for sustainability indicators in mining landscapes: The mining Valley of Laciana (León, Spain). *Informes de la Construcción*, 61, 51-70.
- GARCÍA, R. 2009. *Evaluación del impacto a la salud por metales tóxicos en pobladores de Xochitlán, Hidalgo. Propuesta metodológica integral clínico-ambiental*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- GÓMEZ, D. 2002. *Evaluación de impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión ambiental*, Madrid, Mundi-Prensa.
- GÓMEZ, J. & MESA, A. 2017. Determinación de densidades urbanas sostenibles en base a metodología relativa al acceso solar: caso área metropolitana de Mendoza, Argentina. *Revista de Urbanismo*, 131-145.
- GÓMEZ, J. L. 2014. Del Desarrollo Sostenible a la Sustentabilidad Ambiental. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Militar Nueva Granada*, 22, 115-136.
- GONZÁLEZ, S. 2013. México, uno de los países de AL con más problemas con mineras: Cepal. *La Jornada*.
- GP 2009. Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Pachuca de Soto Estado de Hidalgo 2009-2012. In: SOTO, H. A. D. P. D. (ed.).
- GP 2016. Plan municipal de desarrollo de Pachuca de Soto 2016-2020.
- GP & UACH 2020. Programa de Ordenamiento Ecológico Local - Pachuca de Soto. In: SOTO, H. A. D. P. D. (ed.).
- GRANADOS, J. A. 2007. Las corrientes migratorias en las ciudades contiguas a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: el caso de la aglomeración urbana de Pachuca. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 22.
- GUAN, Y., CHU, C., SHAO, C., JU, M. & DAI, E. 2017. Study of integrated risk regionalisation method for soil contamination in industrial and mining area. *Ecological indicators*, 83, 260-270.
- GUERRERO, D. 2005. Resumen de tesis doctoral/2003. Sistema de indicadores mineros para la explotación sostenible de los recursos minerales (Resumen de tesis doctoral/2003). *Minería y Geología*, 21.
- HÄBERER, H. 2002. *Guía de manejo ambiental para minería no metálica*, Lima, Ministerio de energía y minas.
- HARDIN, G. 1968. La tragedia de los comunes. *Science*, 162, 1243-1248.
- HERNÁNDEZ-ACOSTA, E., MONDRAGÓN-ROMERO, E., CRISTOBAL-ACEVEDO, D., RUBIÑOS-PANTA, J. E. & ROBLES-SANTOYO, E. 2009. Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 15.
- HERNÁNDEZ-ÁVILA, J., REYES-VALDERRAMA, M. I., CERECEDO-SÁENZ, E., MENDOZA-ANAYA, D., RODRÍGUEZ-LUGO, V. & SALINAS-RODRÍGUEZ, E. 2018. Reprocessing of Mining Wastes for the Recovery of Silver by Leaching in the Thiosemicarbazide–Oxygen System. *Preprints*.
- HERNÁNDEZ, J., PATIÑO, F., RIVERA, I., REYES, I. A., FLORES, M. U., JUÁREZ, J. C. & REYES, M. 2014. Leaching kinetics in cyanide media of Ag contained in the industrial mining-metallurgical wastes in the state of Hidalgo, Mexico. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 689-694.
- HERNÁNDEZ, J., RIVERA, I., PATIÑO, F. & JUÁREZ, J. C. 2013. Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema S2O32—O2-Cu2+ Contenido en ResiduosMinero-Metalúrgicos. *Información Tecnológica*, 24, 51-58.
- HERNÁNDEZ, M. A. 2005. *Diagnóstico del impacto ambiental de jales mineros sobre terrenos del municipio El Oro de Hidalgo, Estado de México*. ITESM.

- HOWARD, G., BARTRAM, J., WILLIAMS, A., OVERBO, A., FUENTE, D. & GEERE, J.-A. 2020. *Domestic water quantity, service level and health*.
- HUANG, X., ZHANG, G., PAN, A., CHEN, F. & ZHENG, C. 2018. Protecting the environment and public health from rare earth mining. *Earth's future*, 532-535.
- IDEA. 2022. *Descarga de datos* [Online]. Available: <https://www.gits.igg.unam.mx/idea/descarga> [Accessed enero 18 2022].
- IMIP 2020. Pachuca Sustentable. In: IMIP (ed.). Gobierno de Pachuca.
- INEGI-BI. 2022. *Banco de Indicadores* [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?p=1714&ag=00> [Accessed].
- INEGI 2006. *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por entidad federativa. Metodología*, Mexico, INEGI.
- INEGI 2017. *Metodología de Indicadores de la Serie Histórica Censal*, INEGI.
- INEGI. 2019. *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México. Tabulados básicos* [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/#Tabulados> [Accessed].
- IYALOO, S., KOOTBODIEN, T., NAICKER, N., KGALAMONO, S., WILSON, K. S. & REES, D. 2020. Respiratory health in a community living in close proximity to gold mine waste dumps, Johannesburg, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17.
- IZAH, S. C., CHAKRAVARTY, N. & SRIVASTAV, ARUN LAL 2016. A Review on Heavy Metal Concentration in Potable Water Sources in Nigeria: Human Health Effects and Mitigating Measures. *Exposure and health*, 8, 285-304.
- JENKINS, H. 2004. Corporate social responsibility and the mining industry: conflicts and constructs. *Corporate Social Responsibility and the Environmental Management*, 11, 23-34.
- JIMENEZ, C., HUANTE, P. & RINCON, E. 2006. *Restauración de minas superficiales en México*, SEMARNAT.
- JOCHUM, G. 2015. El Debate sobre el Desarrollo Sustentable: Los orígenes y las dinámicas de un discurso en pos del futuro. *Revista de Geografía Espacios*, 5, 47-63.
- KINNUNEN, P. H.-M. & KAKSONEN, A. H. 2019. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailing valorization. *Journal of Cleaner Production*, 228, 153-160.
- KROOK, J. & BAAS, L. 2013. Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research. *Journal of Cleaner Production*, 55, 1-9.
- KRZYSZTOFIK, R., RUNGE, J. & KANTOR-PIETRAGA, I. 2012. Paths of Environmental and Economic Reclamation: the Case of Post-Mining Brownfields. *Polish Journal and Environmental Studies*, 21.
- LA CRUZ, V. D. & SALOMÓN, L. 2019. Sistematización de indicadores de gestión minera. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 23, 23-36.
- LARROUYET, M. C. 2015. Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta (trabajo final integrador). Bernal: Universidad Nacional de Quilmes.
- LATIF, L. A. 2019. In pursuit of financial justice: Local African communities' quest for legal redress against business related human rights abuses. *Modern Africa*, 7, 55-87.
- LEARITA, L. S. 2015. *Una estrategia para la rehabilitación de las presas de jales abandonadas en el municipio de Zimapán, Hidalgo*. Maestría, Instituto Politécnico Nacional.
- LEZAMA, J. L. & DOMÍNGUEZ, J. 2006. Medio ambiente y sustentabilidad urbana. *Papels de Población*, 153-176.
- LIZÁRRAGA-MENDIOLA, L., ÁNGELES-CHÁVEZ, D. E., BLANCO-PIÑÓN, A., RAMÍREZ-CARDONA, M., OLGUÍN-COCA, F. J. & GONZÁLEZ-SANDOVAL, M. D. R. 2014. Contamination Potential of an

- Urban Mine Tailings Deposit in Central Mexico - A Preliminary Estimation. *International Journal of Geosciences*, 5.
- LM 2022. Ley Minera. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- LÓPEZ, C. R. 2008. Experiencia del INEGI en la elaboración de Indicadores Ambientales y de Desarrollo Sustentable. *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*. México: UNAM, Instituto de Geografía UNAM.
- LÓPEZ, J. & RODRÍGUEZ, M. D. L. 2008. *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*, México, México, UNAM, Instituto de Geografía.
- LÓPEZ, R. C. & MIGUEL, A. E. 2018. Impacto de la infraestructura de salud pública en el desarrollo sustentable, de la zona metropolitana de Tehuantepec en Oaxaca. *repositorio universitario Instituto de Investigaciones Económicas UNAM*.
- LOTTERMOSER, B. G. 2011. Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes. *Elements-An international magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 7, 405-410.
- MCKENZIE, S. 2004. *Social sustainability. Towards some definitions*, Magill, Hawke Research Institute. University of South Australia.
- MEDINA, P. C. 2019. *Población y sostenibilidad urbana. La zona metropolitana de Pachuca*. UAEH.
- MEDINA, P. C. 2020. Distribución de la población y sostenibilidad urbana en el contexto metropolitano de Pachuca. *In: HIDALGO, U. A. D. C. E. C. D. E. D. (ed.) Importancia de la infraestructura verde y la planeación para el desarrollo urbano sustentable*. Mexico.
- MILIÁN-MILIÁN, E., ULLOA-CARCASÉS, M., JORDANA-KREBS, A. S. & ROSARIO-FERRER, Y. 2012. Procedimiento para la rehabilitación minero-ambiental de yacimientos piríticos polimetálicos cubanos. *Minería y Geología*, 28, 20-40.
- MMSD 2002. Proyecto Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable. Abriendo brecha. iied.
- MOHAMED, E. S., ABU-HASHIM, M. & BELAL, A. A. A. 2019. Sustainable indicators in arid region: Case study – Egypt. *Handbook of Environmental Chemistry*.
- MOMOH, J., KANGWA, J. C., UDEAJA, C., RUOYU, J. & SEIDU, R. D. 2021. The development of SUCCEED: urban sustainability assessment tool for developing countries with focus on Nigeria. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*.
- MONTERO, J. M. 2002. Los indicadores de sustentabilidad en la minería. *Indicadores de sustentabilidad para la Industria Extractiva Mineral*. Carajas: CNPq/CYTED.
- MONTIJO, A., LIÑEIRO, H., DE LA O, M., GUTIÉRREZ, G. A., MINJÁREZ, I., CUEN, F., MONREAL, R., SÁMANO, A. P. & ACOSTA, K. 2020. Educación para el manejo y desarrollo sostenible en depósitos de jales mineros en Nacoziari de García, Sonora, México. *In: QARTUPPI, S. D. R. L. D. C. V. (ed.) Educación y Universidad ante el Horizonte 2020*. Hermosillo.
- MORENO, R., MONROY, M. G. & CASTAÑEDA, E. P. 2009. Evaluación geoquímica de residuos mineros (jales o colas) de mineralización de tipo epitermal, Hidalgo, México. *Revista Geológica de América Central*, 79-98.
- MORENO TOVAR, R. 1998. *Caracterización mineralógica y química de desechos mineros (jales), aplicada a la recuperación de valores económicos en Zimapán y Pachuca, Estado de Hidalgo (Tesis inédita de Maestría)*. Instituto Politécnico Nacional.
- MOSSA, J. & JAMES, L. A. 2013. Impacts of Mining on Geomorphic Systems. *Treatise on Geomorphology*. Elsevier.
- MURIEL, R. D. 2006. Gestión Ambiental. *Espacio de reflexión y comunicación en Desarrollo Sostenible*, 3.
- NAWROCKA, D. & PARKER, T. 2009. Finding the connection: environmental management systems and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 17, 601-607.
- NGOLE-JEME, V. M. & FANTKE, P. 2017. Ecological and human health risks associated with abandoned gold mine tailings contaminated soil. *PLoS One*, 12.

- NOM-141-SEMARNAT 2013. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas y jales.
- NOM-157-SEMARNAT 2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- OCMAL. 2022. *Conflictos Mineros en América Latina* [Online]. Available: <https://www.ocmal.org/> [Accessed 20 de mayo 2022].
- OHSOWSKI, B. M., KLIRONOMOS, J. N., DUNFIELD, K. E. & HART, M., M. 2012. The potential of soil amendments for restoring severely disturbed grasslands. *Applied Soil Ecology*, 60, 77-83.
- OMS. 2016. *Planificación urbana, salud y sostenibilidad: el caso de las áreas verdes en Santiago de Chile. ¿Cómo avanzamos hacia el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible?* [Online]. Available: [https://www.paho.org/chi/index.php?option=com\\_docman&view=download&alias=195-areas-verdes-5&category\\_slug=otras-publicaciones&Itemid=1145](https://www.paho.org/chi/index.php?option=com_docman&view=download&alias=195-areas-verdes-5&category_slug=otras-publicaciones&Itemid=1145) [Accessed].
- ONU-AGUA. 2014. *The human right to water* [Online]. Available: [https://www.un.org/waterforlifedecade/human\\_right\\_to\\_water.shtml](https://www.un.org/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml) [Accessed].
- ONU 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. NY, USA.
- PARDO ABAD, C. J. 2014. Indicators of touristic sustainability applied to the industrial and mining heritage: Evaluation of results in some case studies. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 11-36+411-415.
- PEÑA, A., MINGORANCE, M. D., GUZMÁN-CARRIZOSA, I. & FERNÁNDEZ-ESPINOSA, A. J. 2015. Improving the mining soil quality for a vegetation cover after addition of sewage sludges: Inorganic ions and low-molecular-weight organic acids in the soil solution. *Journal of Environmental Management*, 150, 216-225.
- PIMENTEL, B. S., GONZALES, E. S. & BARBOSA, G. O. 2015. Decision-support models for Sustainable Mining Networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2145-2157.
- PIÑA, G. 2014. *Indicadores de Desarrollo Urbano Sustentable para la Zona Metropolitana de Pachuca*. El Colegio del Estado de Hidalgo.
- PNUD 2014. *Índice de Desarrollo Humano Municipal en México: nueva metodología*, Cd. de México, PNUD.
- PNUD 2018. *Índices e indicadores de desarrollo humano. Actualización estadística del 2018*, Nueva York, PNUD.
- PNUMA 2011. Marco Institucional para el Desarrollo Sostenible. Quito, Ecuador: ONU.
- POKHREL, L. & DUBEY, B. 2013. Global Scenarios of Metal Mining Environmental Repercussions, Public Policies and Sustainability: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2352-2388.
- POLO, C. 2006. Los ejes centrales para el desarrollo de una minería sostenible. Santiago de Chile: CEPAL, GTZ.
- PUGA, S., SOSA, M., LEBGUE, T., QUINTANA, C. & CAMPOS, A. 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 1, 149-155.
- PURVIS, B., MAO, Y. & ROBINSON, D. 2019. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14, 681-695.
- QUITERIO-PÉREZ, M., GAYTÁN-OYARZÚN, J. C., GORDILLO-MARTÍNEZ, A. J. & PRIETO-GARCÍA, F. 2018. Teratogenic effect on bone tissue development in *Rattus norvegicus* Wistar strain, induced by the presence of arsenic. *Dyna Revista Fac. Nac. Minas*, 85.

- RAMIREZ-ANDREOTTA, M. D., BRUSSEAU, M. L., ARTIOLA, J. F., MAIER, R. M. & GANDOLFI, A. J. 2014. Environmental Research Translation: Enhancing interactions with communities at contaminated sites. *Science of the Total Environment*, 651-664.
- RAMOS-ARROYO, Y. & SIEBE-GRABACH, C. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, Méxco. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 54-74.
- REYGADAS, P. & SARIEGO, J. L. 2009. Un mundo subterráneo de la significación: los mineros mexicanos. *Relaciones*, 30, 21-55.
- REYNALDO, C. L. & REYNALDO, L. A. 2013. El registro contable de la dimensión ambiental en la actividad minera. *Retos de la Dirección*, 7, 53-64.
- RODRÍGUEZ-ORTEGA, C. & FLORES-MARTÍNEZ, A. 2008. El Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA). *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*. México: UNAM, Instituto de Geografía UNAM.
- RODRÍGUEZ, I., MARTÍNEZ, M. & LÓPEZ, Á. 2015. El riesgo percibido y la gestión de la seguridad. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 47.
- RUSSI, D. & MARTÍNEZ-ALIER, J. 2003. Los pasivos ambientales. *Iconos: Revista de Ciencias Sociales*, 123-133.
- SALAS, M. F. 2009. Efectos de la desconcentración metropolitana en el desarrollo local de una ciudad media: el caso de Pachuca, Hgo. In: HIDALGO, U. A. D. E. D. (ed.) *Desconcentración metropolitana y migración*. Pachuca de Soto.
- SALINAS-RODRÍGUEZ, E., FLORES-BADILLO, J., HERNÁNDEZ-ÁVILA, J., VARGAS-RAMÍREZ, M., FLORES-HERNÁNDEZ, J. A., RODRÍGUEZ-LUGO, V. & CERECEDO-SAÉNZ, E. 2017. Design and production of a new construction material (bricks), using maining tailings. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 225-238.
- SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, D. & EGÉA-JIMENEZ, C. 2011. Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales. su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de población*, 151-185.
- SÁNCHEZ, E. & ORTIZ, M. L. 2014. Escenarios ambientales y sociales de la minería a cielo abierto. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 27-34.
- SE 2022. Etapas del Proceso Productivo para la Pequeña y Mediana Minería. In: SE (ed.). Mexico.
- SEDESOL 2013. Programa de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial de la Zona Metropolitana de Pachuca. Síntesis ejecutiva. Pachuca: Gobierno del Estado de Hidalgo.
- SEMARNAT 2015. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental. México: SEMARNAT.
- SEMARNAT. 2021. *Inventario Homologo Preliminar de Presas de Jales* [Online]. Available: <https://geomaticaportal.semarnat.gob.mx/arcgisp/apps/webappviewer/index.html?id=95841aa3b6534cdfbe3f53b3b5d6edfa> [Accessed 2 de mayo 2022].
- SEMARNAT. 2022. *Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes* [Online]. SEMARNAT. Available: <http://sinat.semarnat.gob.mx/retc/retc/index.php> [Accessed].
- SEMARNAT & CONAFOR 2014. Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Hidalgo.
- SEMARNAT & CONAFOR. 2021. *Inventario Nacional Foestal y de Suelos* [Online]. Available: <https://snmf.cnf.gob.mx/infys/> [Accessed 15 de mayo 2022].
- SEMARNAT, CONAFOR & HIDALGO, S. 2008. Programa de Desarrollo Forestal del Estado de Hidalgo.
- SEMARNAT & SEMARNATH 2016. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire. Proaire.
- SGM 2017. Panorama Minero del Estado de Hidalgo. Pachuca, México: Servicio Geológico Mexicano.
- SGM 2020. Panorama Minero del Estado de Hidalgo. Secretaría de Economía.
- SHRESTHA, R. K. & LAL, R. 2006. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. *Environment International*, 32, 781-796.

- SILVA, M. A. 2006. *Comportamiento estructural por hundimientos de edificaciones ubicadas en distintas zonas en la ciudad de Pachuca*. Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco.
- SILVERIO, W. & JAQUET, J. M. 2009. Prototype land-cover mapping of the Huascarán Biosphere Reserve (Peru) using a digital elevation model, and the NDSI and NDVI indices. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3.
- SORENSEN, P. 2012. Sustainable development in mining companies in South Africa. *International Journal of Environmental Studies*, 69, 21-40.
- SORIANO, L., RUIZ, M. E. & RUIZ, E. 2015. Criterios de evaluación de impacto ambiental en el sector minero. *Industrial Data*, 18, 99-112.
- SU, C., JIANG, L. & ZHANG, W. 2014. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 3, 24-38.
- SUTHERLAND, F. 2015. Community-driven mining heritage in the Cuyuna Iron Mining District: Past, present, and future projects. *The Extractive Industries and Society*, 2, 519-530.
- THANGAVEL, P., SRIDEVI, G., VASUDHEVAN, P. & GUVVALA, S. R. 2018. Plant molecular approaches for successful implementation of mine site rehabilitation. In: ELSEVIER (ed.) *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitations*.
- TORRES, R., ADAME, S. & CAMPOS, E. 2014. Propuesta de indicadores para medir la sustentabilidad en la zona metropolitana de Toluca. *Debate Económico*, 3, 119-143.
- TRIPATHI, S. 2019. Urbanization and Human Development Index: Cross-country evidence. *Munich Personal RePEc Archive*.
- TWARDOWSKA, I. & LACY, W. J. 2004. Regulatory frameworks as an instrument of waste management strategies. *Waste Management Services*. Elsevier.
- UA-SBRP, (EU-MEX), C. & SWEHSC 2008. ¿Que son los jales mineros? *Folleto*.
- UGALDE, V. 2010. La aplicación del derecho ambiental. *Los grandes problemas de México*. México: El Colegio de México.
- UNESCO. 2020. *Geoparques Mundiales de la UNESCO: territorios de resiliencia* [Online]. Available: <https://es.unesco.org/fieldoffice/montevideo/GeoparquesLACResiliencia> [Accessed 22 de abril 2022].
- URRUTIA, G. & BONFILL, X. 2010. Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135, 507-511.
- VALLEJO, O. & GUARDADO, R. 2000. Propuesta de indicadores ambientales sectoriales para el territorio de Moa. *Minería y Geología*, 17, 1-5.
- VERA, J. A. & CAÑÓN, J. E. 2018. El valor agregado de un sistema de gestión ambiental más allá de la certificación. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 16, 86-91.
- VERGARA, C. A. & ORTIZ, D. C. 2016. Desarrollo sostenible: enfoques desde las ciencias económicas. *Apuntes del CENES*, 35, 15-52.
- VOLPI-LEÓN, V., LÓPEZ-LEÓN, L. D., HERNÁNDEZ-ÁVILA, J., BALTAZAR-ZAMORA, M. A., OLGUÍN-COCA, F. J. & LÓPEZ-LEÓN, A. L. 2017. Corrosion Study in Reinforced Concrete Made with Mine Waste as Mineral Additive. *International Journal of Electrochemical Science*, 22-31.
- WIJESEKARA, H., BOLAN, N. S., KUMARATHILAKA, P., GEEKIYANAGE, N., KUNHIKRISHNAN, A., SESHADRI, B., SAINT, C., SURAPANENI, A. & VITHANAGE, M. 2016. Biosolids enhance mine site rehabilitation and revegetation. In: PRESS, A. (ed.) *Environmental Materials and Waste*.
- WINDE, F., KAISER, F. & ERASMUS, E. 2017. Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 668-682.
- WUANA, R. A. & OKIEIMEN, F. E. 2011. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *Isrn Ecology*, 1-20.

XU, D.-M., ZHAN, C.-L., LIU, H.-X. & LIN, H.-Z. 2019. A critical review on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*.