XXXVI CONVENCIÓN INTERNACIONAL DE MINERÍA ACAPULCO 2025
LA MINERÍA UNIDA POR MÉXICO

UNAM POSGRADO Ingeniería
Departamento en Ingeniería de Sistemas

PROPUESTA DE UN MARCO MULTICRITERIO PARA EVALUAR MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN MÉXICO

Ing. María Isabel Tovar Villafaña

Dra. Mayra Elizondo Cortés

Contenido

1. Contexto de la problemática

Drenaje ácido de mina (DAM) y sus impactos en México.

Brechas en la normativa vigente.

2. Problema concreto por resolver

Necesidad de un enfoque estructurado para la toma de decisiones.

Propuesta del marco MCDA (AHP + PROMETHEE).

3. Metodología propuesta

Etapas del modelo.

Integración de AHP y PROMETHEE.

4. Resultados del marco propuesto

Ponderación de criterios.

Jerarquización de alternativas.

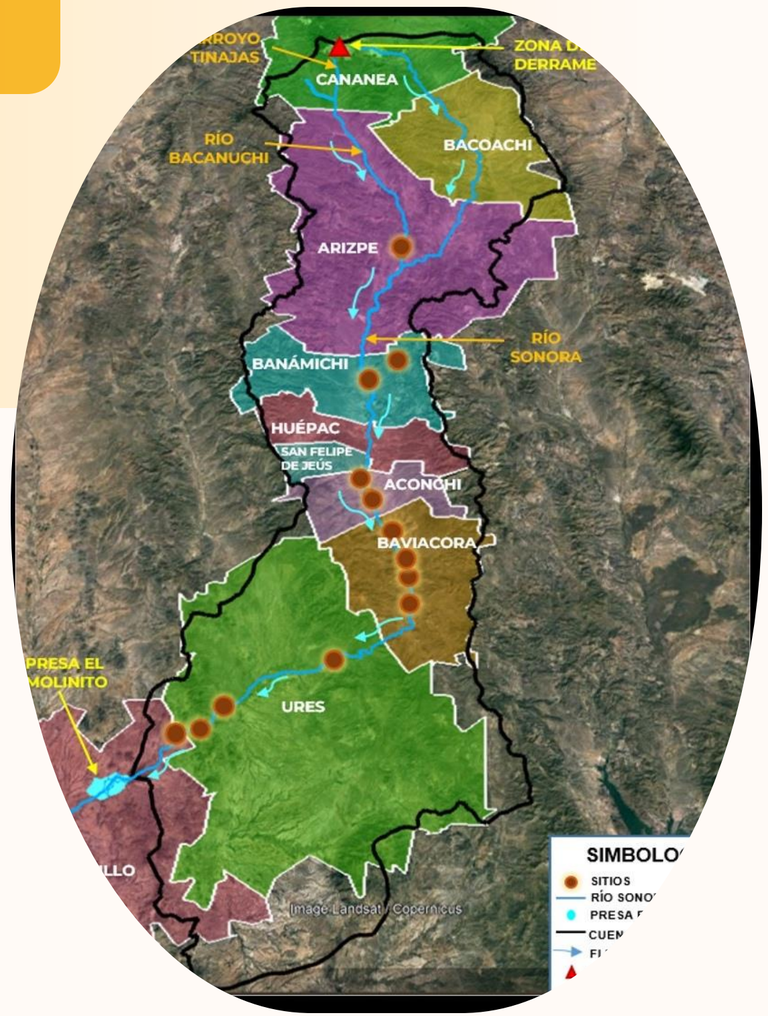
5. Conclusiones y aplicación potencial

Beneficios del modelo para la gestión de pasivos mineros.

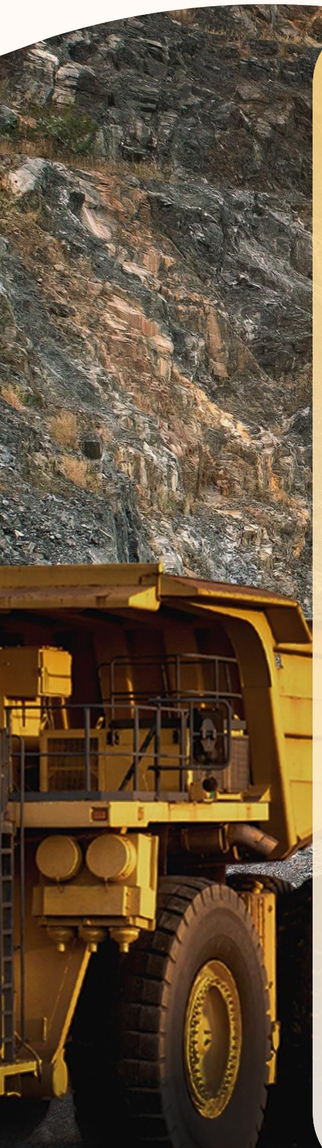
Perspectivas futuras y adopción normativa.

Contexto de la problemática

- El drenaje ácido de mina (DAM) es uno de los principales pasivos ambientales de la minería metálica.
- Se genera por la oxidación de sulfuros (pirita, pirrotita) → producción de ácido sulfúrico → liberación de metales pesados.
- Consecuencias:
  - Acidificación de cuerpos de agua
  - Contaminación de suelos y pérdida de biodiversidad
  - Riesgos a la salud por bioacumulación (As, Cd)
- Casos en México: Cerro de Mercado (Durango), La Prieta (Chihuahua), Cuenca del Río Sonora (2014).



Normativa en México



Normas

- NOM-141-SEMARNAT-2003
- NOM-157-SEMARNAT-2009
- PROY-NOM-157-SEMARNAT-2023

Limitaciones

- Carecen de metodologías claras para jerarquizar alternativas de remediación.
- No integran criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos.
- En contraste, países como Canadá, EE.UU. y Australia incorporan herramientas MCDA en sus lineamientos regulatorios.

Problema concreto por resolver

La remediación del drenaje ácido de mina en México enfrenta una ausencia de metodologías estandarizadas que integren criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos en la toma de decisiones.

Ante esta brecha, se propone un marco multicriterio (MCDA) basado en los métodos AHP y PROMETHEE para priorizar alternativas de remediación del DAM, incorporando criterios ambientales, técnicos, sociales y económicos.

Este enfoque fortalece la toma de decisiones y alinea la gestión de pasivos mineros con estándares nacionales e internacionales de sostenibilidad.

Marco multicriterio propuesto

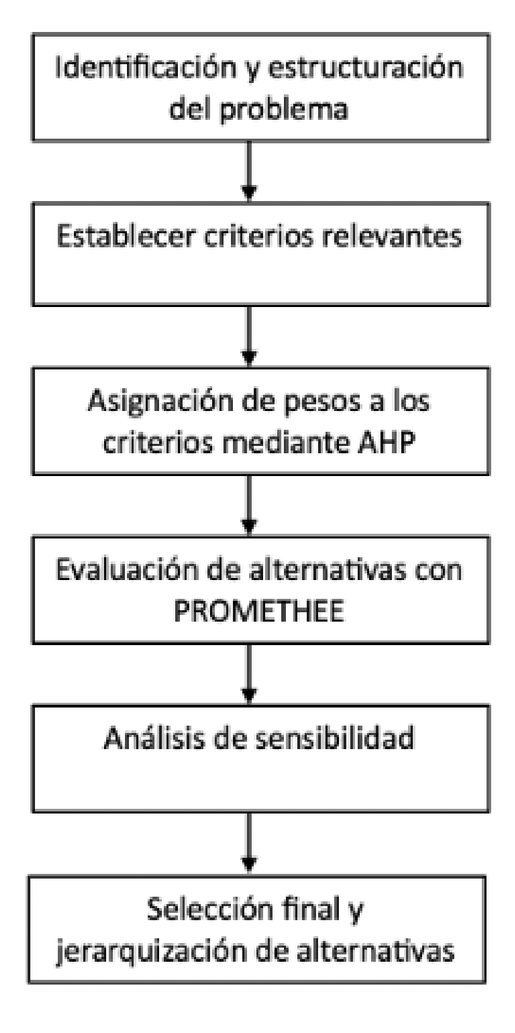
Se revisaron diversos métodos de análisis multicriterio como ELECTRE, TOPSIS, MAUT y Fuzzy-MCDA aplicados a decisiones ambientales complejas.

De acuerdo con la literatura, los métodos AHP y PROMETHEE son los más eficaces para problemas con criterios múltiples, alta incertidumbre y participación de expertos.
México.

Los métodos MCDA permiten:

- Comparar alternativas bajo múltiples dimensiones.
- Incorporar juicios expertos y valores cualitativos.
- Aumentar la transparencia y trazabilidad del proceso.

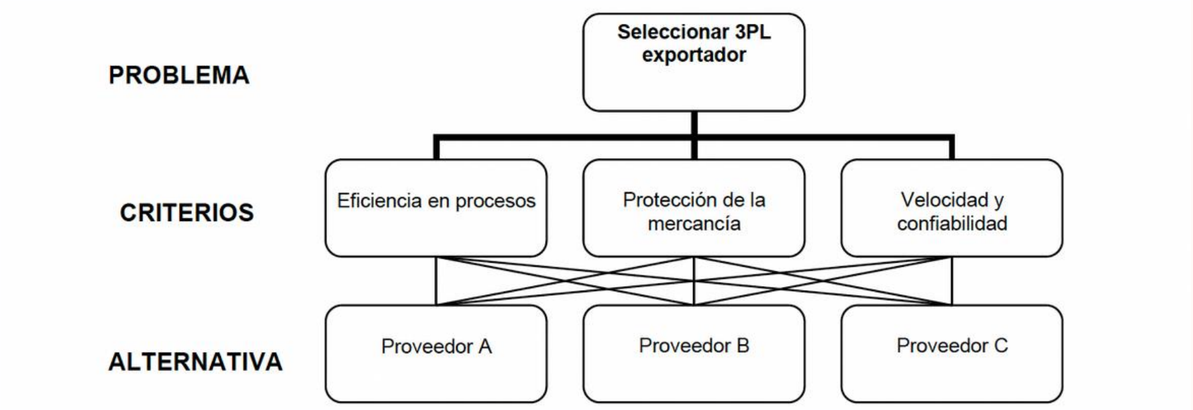
Metodología propuesta



El modelo se organiza en seis etapas que permiten definir criterios, asignar su importancia y comparar alternativas mediante los métodos AHP y PROMETHEE, con el fin de seleccionar la opción de remediación más adecuada para cada sitio con DAM.

Etapa AHP: ponderación de criterios

El AHP, desarrollado por Saaty, permite estructurar un problema complejo en niveles jerárquicos y asignar pesos a los criterios mediante comparaciones por pares basadas en el juicio experto.



Se estructura el problema jerárquicamente.

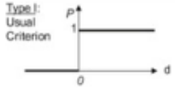
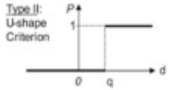
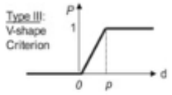
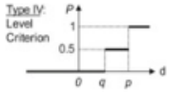
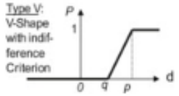
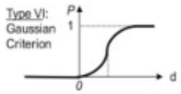
Se realizan comparaciones por pares (escala de Saaty 1-9).

Se calcula el peso relativo de cada criterio y se valida la consistencia (IC < 10%).

Valor de comparación	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos alternativas contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio están moderadamente a favor de una alternativa sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio están fuertemente a favor de una alternativa sobre la otra
7	Importancia muy fuerte	Una alternativa está muy fuertemente favorecida y su dominio ha sido demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	Es máxima la importancia de una alternativa sobre la otra
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios contiguos	Cuando un término medio es necesario
Recíproco de los números de arriba	Si a la alternativa i le fue asignado alguno de los números de arriba al compararse con la alternativa j, entonces j tiene el valor recíproco cuando se compara con i	

Etapa PROMETHEE: jerarquización de alternativas

El PROMETHEE, propuesto por Brans y Mareschal, es un método de sobreclasificación que compara y jerarquiza alternativas considerando múltiples criterios y sus funciones de preferencia.
Permite analizar simultáneamente variables cualitativas y cuantitativas, generando un ranking ordenado de opciones según su desempeño global.

Función de preferencia	Definición
Type I: Usual Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$
Type II: U-shape Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$
Type III: V-shape Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 \leq d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$
Type IV: Level Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{1}{2}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$
Type V: V-Shape with indifference Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q}, & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
Type VI: Gaussian Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, & d > 0 \end{cases}$

Se utilizan funciones de preferencia según tipo de criterio.

Se obtienen flujos positivos, negativos y netos → jerarquía de alternativas.

Ventajas: maneja datos mixtos, ofrece resultados interpretables.

Resultados e implicaciones

El marco propuesto:

- Estandariza la toma de decisiones.
- Integra criterios técnicos, sociales, ambientales y económicos.
- Aumenta transparencia y legitimidad.

Aplicabilidad:

- Planes de manejo y cierre de minas.
- Evaluación de tecnologías de tratamiento.
- Priorización de sitios con alto riesgo de DAM.

Conclusiones

- AHP + PROMETHEE = metodología robusta, transparente y adaptable al marco mexicano.
- Responde a la falta de herramientas operativas en la regulación actual.
- Contribuye a una minería más responsable y sostenible.
- Futuras líneas:
  - -Validación con casos reales
  - -Integración en normatividad

Referencias

- Betrie, G. D., Sadiq, R., Morin, K. A., & Tesfamariam, S. (2013). Selection of remedial alternatives for mine sites: A multicriteria decision analysis approach. Journal of Environmental Management, 119, 36–46.
- Brans, J. P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. En Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (Eds.), Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer.
- García Segura, P., et al. (2022). Mining policy framework assessment: Mexico. IISD.
- Huang, I. B., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. Science of the Total Environment, 409, 3578–3594.
- Kiker, G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P., & Linkov, I. (2005). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. Integrated Environmental Assessment and Management, 1, 95–108.
- Saaty, T. L. (1982). Decision-making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decision in a Complex World. RWS Publications.
- Tesfamariam, S., & Sadiq, R. (2006). Risk-based environmental decision-making using fuzzy AHP. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 21, 35–50.

GRACIAS