

UNIVERSIDAD DE GRANADA
E.T.S DE INGENIERÍA INFORMÁTICA



**Departamento de Ciencias de la Computación e
Inteligencia Artificial**

**Modelo Jerárquico de Evaluación de Impacto
Ambiental empleando Técnicas Difusas.**

Tesis Doctoral

Autor: Lic. Darlines Y. Sánchez Muñoz

Directores: Dr. Miguel Delgado Calvo-Flores

Dr. José Manuel Martín Ramos

Granada, febrero 2008

**MODELO JERÁRQUICO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO
AMBIENTAL EMPLEANDO TÉCNICAS DIFUSAS.**

MEMORIA QUE PRESENTA

DARLINES YAIMA SÁNCHEZ MUÑOZ

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN INFORMÁTICA

FEBRERO 2008

DIRECTORES

DR. MIGUEL DELGADO CALVO-FLORES

DR. JOSÉ MANUEL MARTÍN RAMOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INTELIGENCIA
ARTIFICIAL

ETS INGENIERÍA INFORMÁTICA

UNIVERSIDAD DE GRANADA

La memoria titulada Modelo Jerárquico de Evaluación de Impacto Ambiental empleando Técnicas Difusas, que presenta D. Darlines Yaima Sánchez Muñoz (miembro del Departamento de Informática del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba) para optar por el grado de Doctor, ha sido realizada en el Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, bajo la dirección de los Doctores D. Miguel Delgado Calvo-Flores y D. José Manuel Martín Ramos.

Granada, febrero 2008.

Darlines Yaima Sánchez Muñoz

Miguel Delgado Calvo-Flores

José Manuel Martín Ramos

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a los directores de la tesis, especialmente a Miguel Delgado Calvo-Flores, por su paciencia, dedicación y confianza. Por su ayuda y guía incondicional en todo momento, a pesar de los obstáculos que han dilatado la terminación de la investigación.

También quiero dar mi agradecimiento a los coordinadores del Programa de Doctorado, D. José Luis Verdegay Galdeano y Da. Rosa Isabel Urquiza Salgado por todo el tiempo que han dedicado para que este proyecto salga adelante y hallamos podido culminar la investigación, a pesar de la distancia que separa a las universidades involucradas.

Mi agradecimiento también se hace extensivo a los profesores del Departamento de Informática del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, por su apoyo y comprensión, por haber asumido tareas que en un momento no pude realizar por encontrarme realizando actividades relacionadas con la tesis doctoral.

A las personas que me han apoyado desde lo personal, unos porque inculcaron en mi espíritu de perseverancia, otros porque han soportado momentos en que he estado ausente o no he podido brindarles toda mi atención, a mis padres, mi hermana y mi novio. Mi más sincera gratitud por su apoyo y por las fuerzas que me han dado para seguir adelante.

A todos, muchísimas gracias.

Índice

INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO 1. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	15
Introducción	15
1.1 Características fundamentales del proceso de evaluación de impacto ambiental.	16
1.2 Estudios de Impacto Ambiental	23
1.2.1 Valoración Cualitativa	24
1.2.2 Valoración Cuantitativa	33
1.3 Otras metodologías para la Identificación y Valoración del Impacto Ambiental.	38
1.4 Incorporación de técnicas difusas	59
1.4.1 Investigaciones desarrolladas que incorporan técnicas difusas.	61
1.4.2 Modificaciones a la metodología Crisp	62
CAPITULO 2. HERRAMIENTAS.	65
Introducción	65
2.1 Herramientas matemáticas.	66
2.1.1 Técnicas de Decisión Multicriterio	66
2.2 Actividad Minera. Impactos que ocasiona. Normativas Cubanas.	87
2.2.1 Características de la actividad minera. Principales impactos que ocasiona.	87
2.2.2 Impactos generados por la actividad minera	91
2.2.3 Leyes y normas cubanas relacionadas con minería y Medio ambiente.	93
2.2.4 Situación Ambiental de la Mina de Punta Gorda, Moa, Cuba.	96
CAPITULO 3. UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS MINEROS.	111
Introducción	111
3.1 Metodología Jerárquica-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental. Propuesta para la EIA en la minería de Moa.	112
3.1.1 Identificación de los impactos que cada acción tiene sobre cada factor medioambiental.	115
3.1.2 Caracterización de cada impacto mediante la estimación de su importancia.	116
3.1.3 Caracterización de cada impacto mediante la estimación de su magnitud.	116
3.1.4 Determinar Efecto Ambiental individual de cada impacto. Matriz de Efectos Ambientales.	121
3.1.5 Determinación del Efecto Ambiental Global. Jerarquía de evaluación de efectos.	124
3.1.6 Evaluación de Impacto Ambiental Parcial. División del área del proyecto.	128
3.1.7 Evaluación de Impacto Ambiental Temporal	130
3.1.8 Determinar afectaciones de los factores ambientales dado el Efecto Ambiental Global.	132
3.2 Modelo de Toma de Decisiones en el Diseño de Proyecto Ambiental.	133
3.2.1 Aplicación del AHP al diseño de Proyectos de Evaluación de Impacto Ambiental.	134
3.3 Modelo Genérico de Evaluación de Impacto Ambiental.	143

3.3.1 Descripción del proceso de evaluación de impacto como un conjunto de entidades distribuidas de forma jerárquica.	144
3.3.2 Determinación del efecto ambiental global del proyecto sobre el medio.	145
3.3.3 Estructuración del área del proyecto jerárquicamente.	146
3.3.4 Evaluación del proyecto teniendo en cuenta aspectos temporales.	147
3.3.5 Determinación del comportamiento de las variables ambientales durante el desarrollo de la actividad.	147
CAPITULO 4. UNA ONTOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. UN SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS MINEROS.	149
Introducción	149
4.1 Una descripción de herramientas inteligentes de evaluación de impacto ambiental.	150
4.2 Concepto de ontología y características	154
4.2.1 Tipo de Ontologías	156
4.2.2 Desarrollo de una ontología	157
4.3 Una ontología de Evaluación de Impacto Ambiental	160
4.4 Utilización de la ontología desarrollada	169
4.4.1 Prototipo de Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental	169
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	191
BIBLIOGRAFÍA	195
ANEXOS	199
A1 Teoría de Subconjuntos Difusos	199
A2 Descripción de los indicadores ambientales y sus etiquetas lingüísticas.	209
A3 Encuestas aplicadas a los expertos en Medio Ambiente	214
A4 Sistemas Basados en el Conocimiento	222
A5 Diseño de la Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental	231
A6: Evaluación de Impacto Ambiental aplicada al caso de estudio. Comparación de resultados. Aplicación del Caso de Estudio con la Metodología	232

INTRODUCCIÓN

En Cuba la minería constituye uno de los principales renglones de la economía, la cual proporciona al país cuantiosos ingresos. Por lo importante de la actividad desde el punto de vista económico, las autoridades también dedican especial atención a la relación de esta con el medio ambiente, de forma tal que se logre un desarrollo de la explotación minera lo más sustentable posible y con la menor afectación al medio que pueda lograrse, aunque es sabido que algunos efectos negativos pueden ser irreversibles y algunas medidas para mitigarlos pueden no lograr restablecer el daño en su totalidad.

El Impacto Ambiental es la alteración que se produce en el ambiente cuando se lleva a cabo un proyecto o una actividad. Las obras públicas, la construcción de una carretera, un pantano o un puerto deportivo; las ciudades, las industrias, una zona de recreo para pasear por el campo o hacer escalada, una granja o un campo de cultivo, o como en nuestro caso, la minería, tienen un impacto sobre el medio. La alteración no siempre es negativa y es bien conocido que existen muchas actuaciones que son favorables para el medio.

Una Evaluación de Impacto Ambiental puede entenderse como el procedimiento adoptado para valorar en que medida un determinado proyecto es o no compatible con el medio ambiente y por lo tanto determinar si debe o no ejecutarse; en caso de ser aceptado las condiciones que deben seguirse en su ejecución, y en caso de ser rechazado que cambios lo hacen aceptable.

La descripción de cualquier proyecto así como la evaluación de su impacto ambiental están llenas de valoraciones, calificativos o clasificaciones de tipo lingüístico que son inherentes a la propia naturaleza de las magnitudes consideradas. Consideremos por ejemplo la magnitud “periodo de ejecución” para la cual suele darse una valoración en términos de corto, medio o largo plazo sin ajustar mucho más un número concreto de años. A su vez la variable de evaluación “importancia de un impacto” se suele valorar como Irrelevante, Moderada, Severo o Crítica, etiquetas de semántica clara pero sin diferencia nítida entre ellas.

Las metodologías clásicas de EIA asignan escalas numéricas a estas etiquetas, lo que adolece del problema de distinguibilidad entre valores próximos. Si suponemos que el corto plazo es hasta 8 años, un proyecto de exactamente ocho años sería “corto” y uno con 8.2 años sería de duración media, pero está claro que estos dos proyectos no son de duración lo suficientemente significativa como para asignarles dos etiquetas diferentes. Este problema de indistinguibilidad entre valores próximos también se presenta cuando las variables son valoradas directamente por medio de números y al contrario que antes lo que interesa es agrupar valores bajo etiquetas semánticamente más significativas que los valores numéricos originales.

La Teoría de Subconjuntos Difusos, introducida por Zadeh en 1965, proporciona herramientas para modelar conceptos vagos, clases con fronteras mal definidas en las que la transición entre el “ser” y el “no ser” es gradual y no brusca. Por ello pensamos que la introducción de las herramientas que proporciona la Teoría de Subconjuntos difusos en el modelado de la Evaluación de Impacto Ambiental puede proporcionar metodologías más ajustadas a la realidad (a la forma de hablar y actuar de los expertos) que las que se obtienen empleando las aproximaciones puramente numéricas. En concreto vamos a desarrollar la versión lingüística de la metodología matricial de V. Conesa [13] por ser una de las más completas y muy usada en la práctica, además de que nos sirve de base para el modelo que desarrollamos en esta investigación.

Por otro lado, ninguna de las metodologías de EIA actualmente disponibles en la literatura permite llevar a cabo una evaluación de una parte de un proyecto, bien sea espacial o temporalmente, sino que todas ellas obligan a realizar el estudio de la totalidad. Desde el punto de vista práctico resulta muy interesante para los expertos poder segmentar la evaluación de impacto ambiental bien temporalmente, bien espacialmente bien de ambas maneras simultáneamente, ya que de esta forma puede ajustarse el proyecto global teniendo en cuenta las interacciones entre sus secciones espacio/temporales. Por estas razones hemos completado nuestro modelo lingüístico con la posibilidad de realizar estas evaluaciones parciales, tanto espacial como temporalmente.

Los objetivos de la investigación son:

- Desarrollo de un Modelo Jerárquico-Matricial de Evaluación de Impacto Ambiental que permite:
 - La integración de la Teoría de Conjuntos Difusos a la Evaluación de Impacto Ambiental.
 - La jerarquización del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental partiendo desde los aspectos generales hacia los particulares.
 - La posibilidad de realizar evaluaciones temporales, lo cual permite desarrollar comparaciones entre evaluaciones desarrolladas en intervalos de tiempo diferentes.
 - La posibilidad de realizar evaluaciones espaciales, lo cual permite desarrollar evaluaciones de un área del proyecto, conociendo evaluaciones desarrolladas con anterioridad en otras áreas del mismo.
 - El Diseño de Proyectos Ambientales a partir de un valor de Efecto Ambiental Global.
- Desarrollo de un Modelo Genérico para la Evaluación de Impacto Ambiental
- Desarrollo de una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Implementación de un Prototipo de Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos de minería.

Esta memoria está estructurada de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se hace una descripción de la Evaluación de Impacto Ambiental, las herramientas que sirven para llevar a cabo el proceso, donde se expone por fases la metodología que sirve de base a la jerárquica-matricial desarrollada.

En el capítulo 2 se muestran las herramientas que sirvieron de base para el desarrollo de la investigación, y en que etapa de esta fueron utilizadas. Comenzamos describiendo las herramientas matemáticas y después se incluye una descripción detallada de la actividad minera en el yacimiento tomado como caso de estudio, el de

Punta Gorda, en Moa, los impactos ambientales ocasionados, así como las actividades que allí se desarrollan para lograr la extracción del mineral.

En el capítulo 3 se describe como a partir del conocimiento extraído de los intercambios de información con los expertos encargados de realizar las evaluaciones de impacto en este yacimiento, surge la que hemos denominado Metodología Jerárquico-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental. Se describen las fases por las que está formada, así como una generalización de la misma para proyectos de otra naturaleza.

En el último capítulo, describimos el Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental desarrollado, el cual constituye una herramienta de apoyo a los expertos en medio ambiente durante el proceso de evaluación de impacto ambiental de proyectos mineros.

CAPITULO 1. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Introducción

La evaluación de impacto ambiental, es un proceso que adquiere vital importancia cuando se necesita sea aprobado por las autoridades pertinentes un proyecto que se vaya a poner en marcha. Su objetivo principal es asegurar al planificador del proyecto que las opciones para su desarrollo son ambientalmente adecuadas y sustentables.

Numerosos autores han tratado temas relacionados con el proceso que se realiza una vez que se decide emprender un proyecto, en este primer capítulo, en el epígrafe 1, se hace una descripción general del proceso de evaluación de impactos y las fases que lo conforman, mostrándose los aspectos conceptuales de la misma partiendo de la necesidad de su aplicación.

En un segundo epígrafe se plantean cuestiones relacionadas con el estudio de impacto ambiental como documento técnico dentro del proceso de evaluación, y las fases por las que se transcurre en su elaboración, teniendo en cuenta además, los aspectos legislativos que guardan relación con este.

Para realizar la evaluación de impacto, se han desarrollado en dependencia de determinados tipos de proyectos, metodologías que permiten conocer a priori el nivel de afectación del proyecto al medio, en el epígrafe 3, se hace una descripción de algunas de estas, haciendo énfasis en el motivo de su elaboración.

Por las características de la información que se manipula entre los expertos en medio ambiente, en trabajos desarrollados anteriormente se ha visto la conveniencia de utilizar la Teoría de Conjuntos Difusos en la evaluación de impacto [19] y [36]. En el último epígrafe planteamos la inclusión en nuestra investigación de estos aspectos, y cómo sería modificada cada etapa del estudio de impacto ambiental.

1.1 Características fundamentales del proceso de evaluación de impacto ambiental.

La nueva percepción de lo ambiental a nivel internacional, ha traído repercusiones directas sobre las estructuras tradicionalmente establecidas para el manejo y vigilancia de los recursos naturales y el medio ambiente. En la actualidad, para que un nuevo proyecto sea puesto en marcha, se exige realizar un estudio de impacto ambiental como requisito previo al otorgamiento de la licencia ambiental, documento que debe demostrar la viabilidad ambiental del proyecto que se evalúe.

El Impacto ambiental es la alteración que se produce en el ambiente cuando se lleva a cabo un proyecto o una actividad. Las obras públicas como la construcción de una carretera, un pantano o un puerto deportivo; las ciudades; las industrias; una zona de recreo para pasear por el campo o hacer escalada; una granja o un campo de cultivo; y sobre todo un proyecto relacionado con la actividad minera, como es nuestro caso, cualquiera de estas tiene un impacto sobre el medio. La alteración no siempre es negativa. Puede ser favorable o desfavorable para el medio. Los efectos de los impactos ambientales pueden presentarse a corto o a largo plazo, pueden ser de corta o larga duración, algunos son reversibles y otros irreversibles, previsibles o inevitables, en algunos casos su efecto es acumulable, muchos de ellos son evidentes como consecuencia directa de la acción del proyecto sobre el medio, en otros casos no resultan fáciles de identificar, porque son inducidos a partir de los impactos primarios o directos, pero sus consecuencias son las que ocasionan mayores problemas en vista de que resultan a largo plazo y puede no haber un responsable visible a quien señalar, además de que normalmente las medidas correctivas se aplican a posteriori cuando el daño ambiental esta hecho y sus costos resultan ser en bastantes casos externos al que los causó [13].

Dentro de los instrumentos disponibles para el abordaje de la problemática ambiental, la evaluación de impacto ambiental representa la herramienta técnica de carácter preventivo por excelencia, la cual constituye a su vez en instrumento de redacción de proyectos.

Una Evaluación de Impacto Ambiental es el procedimiento adoptado para establecer si un determinado proyecto, sometido a la evaluación, es o no compatible con el medio ambiente, y por lo tanto determinar si debe o no ejecutarse, así como, en caso de ser aceptado, las condiciones que deben seguirse en su ejecución.

Los fundamentos de la Evaluación de Impacto Ambiental tienen que ver con [4]:

- Evaluar los impactos que provocan las acciones humanas sobre el medio.
- Considerar el medio ambiente como la integración de sistemas físicos, biológicos, humanos y sus relaciones.
- Considerar los impactos como la alteración positiva y negativa de carácter significativo del ambiente por causas humanas.

La EIA propugna un enfoque a largo plazo y supone y garantiza una visión completa e integrada del significado de las acciones humanas sobre el ambiente. También implica creatividad e ingenio y una fuerte responsabilidad social en el diseño y la ejecución de las acciones y proyectos. La motivación para investigar las nuevas soluciones tecnológicas y, en definitiva, para una mayor reflexión en los procesos de planificación y de toma de decisiones, es otro elemento importante en la evaluación de impacto ambiental, implica la búsqueda de alternativas para alcanzar soluciones viables.

El enfoque preventivo consiste en identificar y evaluar los impactos ambientales antes de que se produzcan; es decir, previo a la ejecución de cualquier acción humana. Desde este punto de vista, se realiza un análisis integrado en función de las prioridades ambientales de cada país o institución.

Para ello existen pasos importantes que se deben considerar en la evaluación [13]:

1. Definir exactamente lo que se debe excluir por no ser ambientalmente significativo. También denominado “selección” o “screening”.
2. Definir el alcance que determina los puntos claves que son necesarios de examinar en la evaluación. También denominado “scoping”.

3. Utilizar los métodos particulares en cada caso, como el análisis de escenarios, los estándares ambientales de tipo preventivo, y el uso de metodologías integradoras.
4. Definir las necesidades de información y de participación de la ciudadanía

La evaluación de impacto ambiental permite comparar las situaciones ambientales existentes con aquellas que surgirían como resultado del desarrollo de una acción en particular. La comparación sirve para identificar tanto los impactos positivos y los beneficios ambientales que surgen de realizar el proyecto que se está evaluando, como aquellos de carácter negativo que deben manejarse para evitar la degradación del medio ambiente. Lo más significativo es que se incorporen las medidas que aseguren la protección del medio ambiente y que hagan viable la acción; si ello no es posible, la acción no debe ser ejecutada.

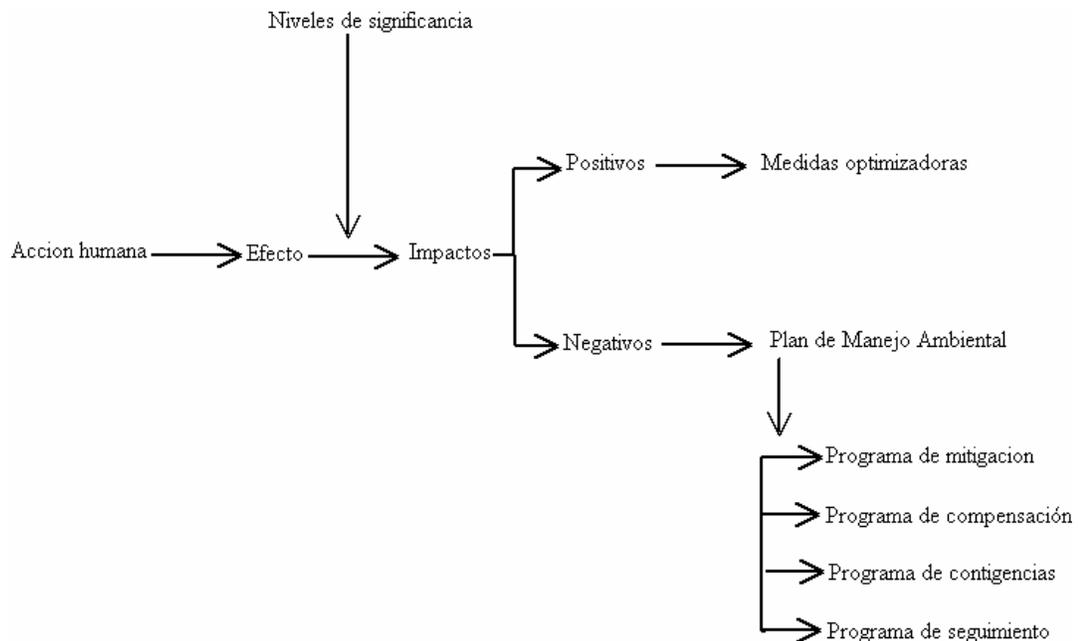


Figura 1.1: Estructura conceptual del Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental

La EIA es necesaria por varias razones, entre las que destacan [4]:

- Detener el proceso degenerativo.

- Evitar graves problemas ecológicos.
- Mejorar nuestro propio entorno y calidad de vida.
- Ayudar a perfeccionar el proyecto.
- Defender y justificar una solución acertada.
- Canalizar la participación ciudadana.

La no realización del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental antes de la puesta en marcha de un proyecto, puede traer consigo:

- La toma de decisiones inadecuadas
- La falta de compromiso con las partes involucradas
- Retraso en la decisión
- Perjuicios políticos y malas relaciones institucionales
- Perdidas financieras
- Fracaso del proyecto

Un proceso de evaluación de impacto ambiental no es en sí mismo un instrumento de decisión, sino que genera un conjunto ordenado, coherente y reproducible de antecedentes que permiten al promotor de un proyecto, a la autoridad competente y a la ciudadanía, en cada caso, tomar decisiones informadas y certeras.

La EIA debe ejecutarse cumplimentando varias fases, que la experiencia internacional reconoce como obligatorias para su correcta aplicación como instrumento de gestión. Sin embargo, es conveniente resaltar que dichas fases se expresan de manera diversa, dependiendo de los requerimientos adoptados por los países o instituciones. Son en conjunto 12, que citamos a continuación:

1. Análisis del proyecto
2. Definición del entorno
3. Previsión de efectos
4. Identificación de acciones
5. Identificación de factores
6. Identificación de Impactos. Matriz de Importancia

7. Valoración de los impactos
8. Evaluación cuantitativa
9. Medidas correctoras. Plan de vigilancia ambiental
10. Participación pública
11. Informe final
12. Declaración de impacto ambiental.

Las primeras tres fases tienen por objetivo conocer en profundidad el proyecto y sus alternativas, así como efectuar una primera aproximación a la estimación de sus consecuencias medioambientales. Las fases 4, 5 y 6 se agrupan bajo el nombre de Valoración Cualitativa, mientras que las fases 7, 8 y 9 se conocen como la Valoración Cuantitativa [13].

Por otra parte, las tres últimas fases se relacionan con las consecuencias sociales de la evaluación que se recopilan en la declaración de Impacto Ambiental. Los objetivos de las 12 fases se resumen a continuación:

1. En el **Análisis del proyecto** se estudian los objetivos del proyecto, su alcance y duración, así como todos los detalles que puedan ser de utilidad para identificarlo.
2. La **Definición del entorno** consiste en la delimitación espacial de la porción de medio ambiente afectada por el proyecto; la principal dificultad en este punto consiste en que para cada factor ambiental puede definirse un entorno.
3. La **Previsión de efectos** es una primera estimación de los posibles efectos del proyecto sobre el entorno. Suele ser una enumeración de los mismos, sin entrar a detallarlos.
4. **La Identificación de Acciones** consiste en desglosar el proyecto para encontrar cuáles son las actividades potencialmente impactantes sobre el entorno.
5. En la **Identificación de Factores** se obtiene un modelo simplificado del entorno, como un conjunto de factores ambientales relevantes, representativos y fácilmente analizables.
6. En la **Identificación de Impactos** se buscan cuáles son los efectos que cada acción tiene sobre cada factor ambiental; estos efectos valoran de acuerdo a su

importancia y se consignan en una Matriz de Importancias, que será analizada para determinar la Importancia del Impacto Total. Esta fase es la más delicada de la Valoración Cualitativa, ya que en ella se efectúa la estimación cualitativa de los impactos.

7. En la **Valoración de los impactos** se obtiene una estimación numérica de cada uno de los impactos; para ello se define un indicador ambiental para cada factor en términos del cual se hace la estimación.
8. La **Evaluación Cuantitativa** es un proceso mediante el que se estima, a partir de los datos obtenidos en la valoración cuantitativa, qué tanto varía la Calidad Ambiental del entorno, y por tanto cuál es el Valor del impacto total producido por el proyecto.
9. Las **Medidas Correctoras y preventivas** buscan disminuir el impacto del proyecto. Para verificar que sean ejecutadas correctamente, así como para conocer si las predicciones sobre los impactos son o no acertadas se elabora un Plan de Vigilancia ambiental que deberá ejecutarse a lo largo de todas las etapas del proyecto.
10. El propósito de la **Participación pública** es el de disponer de un mecanismo de control social sobre el proceso de Evaluación del Impacto Ambiental.
11. En el **Informe final** se recopilan todos los análisis de las fases anteriores.
12. La **declaración de impacto ambiental** refleja la decisión de la administración pública sobre la autorización o no de ejecutar el proyecto.

La Evaluación de Impacto Ambiental puede ser Simplificada o Detallada según se omitan o no las fases 7, 8 y 9. Las fases 4, 5 y 6 se agrupan bajo el nombre de Valoración Cualitativa, mientras que las fases 7, 8 y 9 se conocen como Valoración Cuantitativa.

Es importante resaltar que el Estudio de Impacto Ambiental es un documento técnico que se incorpora dentro del proceso jurídico-administrativo que es la Evaluación de Impacto Ambiental. Generalmente es necesario establecer un equipo de carácter interdisciplinario para efectuar el estudio.

La evaluación de impacto ambiental presenta un conjunto de ventajas que deben

ser respetadas e incluidas, y que lo hace un instrumento apropiado para lograr una adecuada protección ambiental [30]:

- Previsión de los impactos negativos y positivos de una acción sobre la población y el medio ambiente.
- Conocimiento o entendimiento de los principales acción humana para lograr una comprensión profunda y extensa en una determinada localización. Esto se produce al facilitar una información integrada de los posibles impactos sobre el medio natural, construido y social.
- Racionalización de la toma de decisiones, ya que se orienta a la definición de un curso de acción futuro para resolver problemas, satisfacer necesidades y aprovechar oportunidades de un determinado sistema territorial.
- Coordinación adecuada, puesto que conocer los impactos ambientales de una acción permite una interacción multidisciplinaria que requiere de una coordinación intersectorial para abordarlos desde un punto de vista global.
- Flexibilidad para estudiar los efectos ambientales de una acción concreta en una determinada localización y aplicar medidas correctivas ajustadas a un entorno dado, optimizando el uso de los recursos utilizados. Esto supone una mayor flexibilidad que la rígida aplicación de la legislación general en forma independiente de las particularidades de cada caso. Por lo tanto, facilita una mejor adaptabilidad a las necesidades ambientales locales.
- Eficiencia en el uso de los recursos públicos y privados, por cuanto se analizan las alternativas de acción que evitan o disminuyan impactos en el medio ambiente, reduciendo la necesidad de destinar recursos en acciones correctivas posteriores.
- Participación Ciudadana a través de su incorporación en un proceso de evaluación de impacto ambiental la comunidad se interioriza sobre los impactos, tanto ambientales como socioeconómicos y culturales, de una determinada acción, evitando los de carácter negativos sobre su entorno inmediato y conflictos posteriores.

1.2 Estudios de Impacto Ambiental

La preparación de un Estudio de Impacto Ambiental previo a la toma de decisiones que puedan afectar significativamente la calidad del ambiente es la forma más difundida de evaluación de impacto ambiental.

La Declaración de Impacto Ambiental se soporta técnicamente en el Estudio de Impacto Ambiental, que por tanto debe intentar presentar la “realidad objetiva, para conocer en qué medida repercutirá sobre el entorno la puesta en marcha de un proyecto, obra o actividad. Ésta no es una tarea sencilla, ya que muchos de los efectos que podríamos denominar parciales, son difíciles de predecir, y su efecto conjunto no es fácil de valorar objetivamente. Además suele ocurrir que no todas las predicciones de los efectos sean realizadas por la misma persona, sino que se trata de predicciones llevadas a cabo por miembros de un equipo interdisciplinario, lo que obliga a buscar una forma de homogeneizar los resultados de cada experto, con la dificultad que esto conlleva.

El Estudio de Impacto Ambiental se inicia con el Análisis del Proyecto y la Definición del Entorno. Estas etapas permiten definir el contexto dentro del cual se enmarcará el estudio; nuestro interés se centra en las etapas de Valoración Cualitativa y Cualitativa, por lo que podemos prescindir de las fases previas.

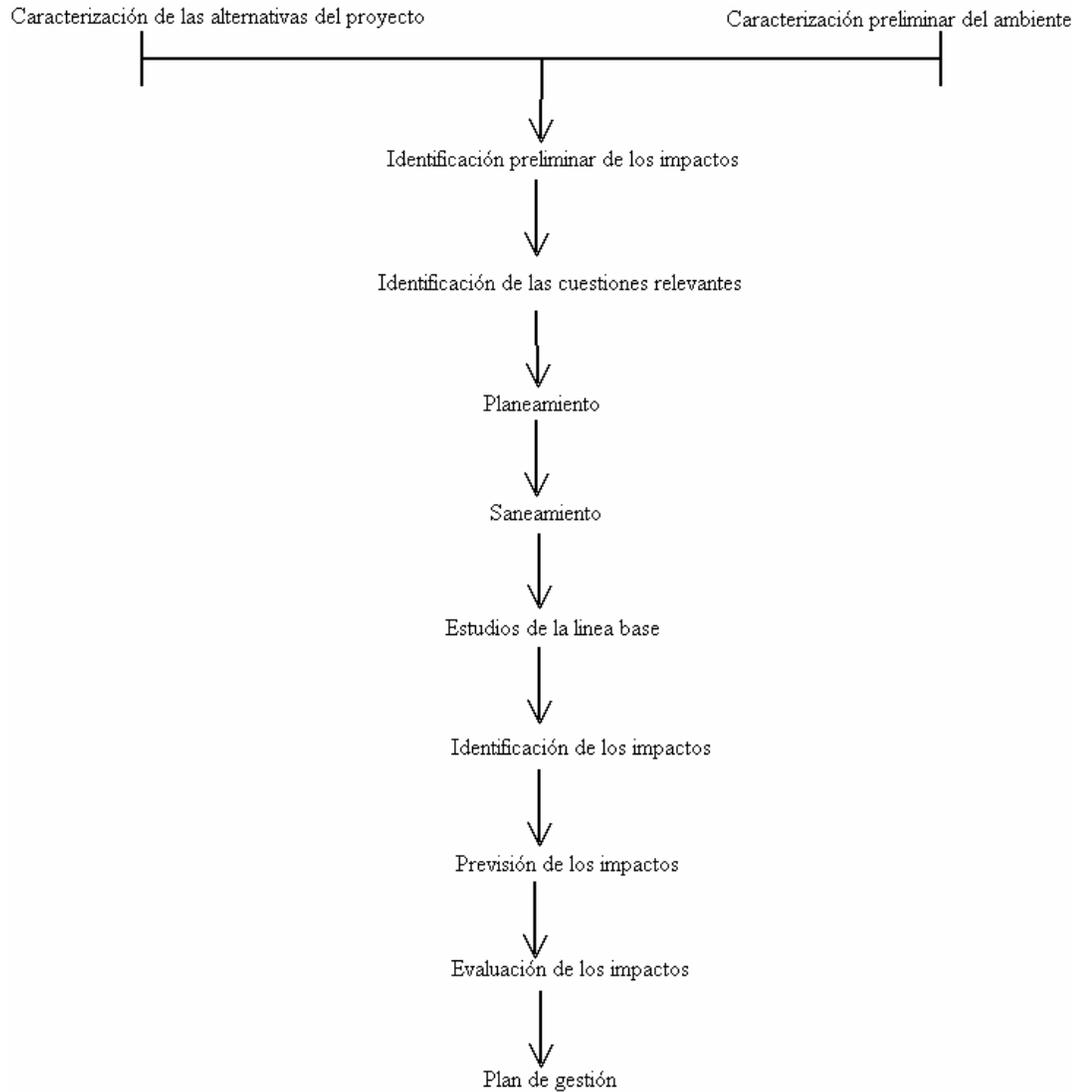


Figura 1.2: Principales actividades en la elaboración de un estudio de impacto ambiental

1.2.1 Valoración Cualitativa

En la etapa de Valoración Cualitativa se busca obtener una estimación de los posibles efectos que recibirá el medio ambiente, mediante una descripción lingüística de las propiedades de tales efectos. Tal como se explicará en los siguientes apartados, los distintos expertos deben catalogar ciertas variables con etiquetas tales como “Baja” o “Media” y a partir de esa información se obtiene un conocimiento cualitativo del impacto ambiental. La metodología puede resumirse en los siguientes pasos, que se

detallan a continuación:

- Describir el medioambiente como un conjunto de factores medioambientales.
- Describir la actividad que se evalúa como un conjunto de acciones.
- Identificar los impactos que cada acción tiene sobre cada factor medioambiental.
- Caracterizar cada impacto mediante la estimación de su Importancia.
- Analizar la importancia global de la actividad sobre el medio, utilizando para ello las importancias individuales de cada impacto.

Identificación de Factores Ambientales

El entorno medioambiental puede considerarse como constituido por un conjunto de elementos que se interrelacionan. El estudio del entorno en su totalidad es extremadamente complejo, por lo que se hace necesario construir un modelo simple que permita su comprensión. Con este objetivo, el entorno suele dividirse en sistemas ambientales, éstos en subsistemas ambientales, éstos a su vez en componentes ambientales, que por último se dividen en factores ambientales.

A cada factor medioambiental se le asigna una medida de su Importancia relativa al entorno, medida en Unidades de Importancia (UIP), y que servirá posteriormente para efectuar ponderaciones en las estimaciones globales de los efectos. Para determinar cuáles son los factores que conforman el entorno, y cuál es la importancia de cada uno de ellos, deben seguirse los siguientes criterios:

- Deben ser representativos del entorno afectado
- Deben ser relevantes
- Deben ser excluyentes entre sí
- Deben ser de fácil identificación
- Deben ser de fácil cuantificación.

Las UIP asignadas a cada factor permitirán realizar posteriormente ponderaciones de los efectos globales; para facilitar esta tarea, así como para facilitar la interpretación de las UIP, suele establecerse la condición de que la suma de las UIP de

todos los factores debe ser 1000. En la Tabla 1.1 se muestra un ejemplo de clasificación del entorno hasta el nivel de componentes ambientales, la identificación de los factores no es única, sino que depende del caso específico que se esté estudiando [13].

Sistema	UIP
Subsistema	(Total=1000)
Componente	
• Medio Físico	600
○ Medio Inerte	300
▪ Aire	100
▪ Tierra y Suelo	100
▪ Agua	100
○ Medio Biótico	200
▪ Flora	100
▪ Fauna	100
○ Medio Perceptual	100
▪ Unidades de Paisaje	100
• Medio Socio-económico	400
○ Medio Sociocultural	275
▪ Usos del Territorio	75
▪ Cultura	50
▪ Infraestructuras	50
▪ Humanos y estéticos	100
○ Medio Económico	125
▪ Economía	50
▪ Población	75

Tabla 1.1: Distribución jerárquica de los factores ambientales.

Identificación de Acciones del Proyecto

Para la realización del EsIA, se debe determinar el aspecto cronológico de la misma, es decir; se debe concretar si se realizará un EsIA con una situación (ST0), lo

que nos permitirá obtener una valoración del impacto en un determinado punto temporal del proyecto, o bien con dos situaciones temporales (ST2-ST1), lo que conllevará la posibilidad de estimar la evaluación del impacto en dos situaciones distintas del proyecto.

Uno de los estudios de Impacto Ambiental más comunes, es aquel con dos situaciones, que enfrenta la situación del medio con el proyecto con la situación medio evolucionado sin el proyecto, posibilitando la obtención del impacto real en dos situaciones distintas del proyecto.

El proyecto que es objeto de evaluación se modela como un conjunto de Acciones, que pueden agruparse en Actividades. En ocasiones se desea comparar dos o más opciones de proyecto, para determinar cuál de ellas tienen un impacto menor; con este propósito, se agrupan las actividades de cada una de las opciones en Situaciones. Una de las comparaciones más usuales consiste en enfrentar la Situación con proyecto con la Situación sin proyecto, para determinar el impacto real de la ejecución del proyecto.

- Actuación sobre el Entorno
 - Situaciones
 - Actividades
 - Acciones

Identificación de los Efectos sobre el Medio Ambiente. Matriz de Importancia.

Una vez determinados los factores y las acciones se procede a identificar los Impactos que estas últimas tienen sobre los primeros.

Los expertos del equipo interdisciplinario deben determinar la Importancia de cada efecto, proporción mediante la cual se mide cualitativamente el impacto ambiental, en función tanto del grado de incidencia o intensidad de la alteración producida, como de la caracterización del efecto, que responde a su vez a una serie de atributos de tipo cualitativo. Quedará consignada en la Matriz de Importancia del proyecto. Las filas corresponden a los factores distribuidos jerárquicamente y las columnas corresponden a

las Acciones también ubicadas de forma jerárquica. En la celda ij de la Matriz se consigna la Importancia I_{ij} del impacto que la acción A_j tiene sobre el factor F_i , y los totales se emplean para agregar la información correspondiente a una determinada acción o factor respectivamente.

Determinación de la Importancia de los Impactos.

La importancia de un impacto es una medida cualitativa del mismo que se obtiene a partir del grado de incidencia (Intensidad) de la alteración producida, y de una caracterización del efecto. En la metodología crisp se propone calcular la importancia de los impactos siguiendo la expresión:

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

cuyos términos están definidos en la Tabla 2, y son explicados en los apartados siguientes. En esa misma tabla se han anotado los valores numéricos que se deben asignar a las variables, según la valoración cualitativa correspondiente. Cada Impacto podrá clasificarse de acuerdo a su importancia I como:

- Irrelevante o Compatible : $13 \leq I < 25$
- Moderado : $25 \leq I < 50$
- Severo : $50 \leq I < 75$
- Crítico : $75 \leq I$

Aunque se pretende que la importancia sea una medida cualitativa, en realidad se calcula cuantitativamente, asignando para ello números enteros a cada una de las etiquetas. La descripción cualitativa de la metodología crisp en realidad es una descripción cuantitativa basada en números enteros.

NA: NATURALEZA		IN: INTENSIDAD	
- Beneficioso	+1	- Baja	1
- Perjudicial	-1	- Media	2
		- Alta	4
		- Muy Alta	8
		- Total	12
EX: EXTENSIÓN		MO: MOMENTO	
- Puntual	1	- Largo Plazo	1
- Parcial	2	- Medio Plazo	2
- Extenso	4	- Inmediato	4
- Total	8	- Crítico	+4
- Crítico	+4		
PE: PERSISTENCIA		RV: REVERSIBILIDAD	
- Fugaz	1	- Corto Plazo	1
- Temporal	2	- Medio Plazo	2
- Permanente	4	- Irreversible	4
SI: SINERGISMO		AC: ACUMULACIÓN	
- Sin sinergismo	1	- Simple	1
- Sinérgico	2	- Acumulativo	4
- Muy Sinérgico	4		
EF: RELACIÓN CAUSA-EFECTO		PR: PERIODICIDAD	
- Indirecto (secundario)	1	- Irregular	1
- Directo (primario)	4	- Periódico	2
		- Continuo	4
MC: RECUPERABILIDAD		I: IMPORTANCIA	
- De manera inmediata	1		
- A medio plazo	2		
- Mitigable	4		
- Irrecuperable	8		

Tabla 1.2: Valores de las variables de la importancia

Naturaleza

Hace referencia al carácter beneficioso o perjudicial del Impacto. En algunos casos concretos el impacto puede ser previsible pero difícil de cualificar sin estudios más detallados; en tales ocasiones la Naturaleza deberá marcarse como x, lo que tiene como consecuencia lógica la imposibilidad de calcular la Importancia.

Intensidad

Expresa el grado de incidencia de la acción sobre el factor, que puede considerarse desde una afección mínima hasta la destrucción total del factor.

Extensión

Representa el área de influencia esperada en relación con el entorno del proyecto, que puede ser expresada en términos porcentuales. Si el área está muy localizada, el impacto será puntual, mientras que si el área corresponde a todo el entorno el impacto será total.

Momento

Se refiere al tiempo que transcurre entre el inicio de la acción y el inicio del efecto que ésta produce. Puede expresarse en unidades de tiempo, generalmente años, y suele considerarse que el Corto Plazo corresponde a menos de un año, el Medio Plazo entre uno y cinco años, y el Largo Plazo a más de cinco años.

Persistencia

Se refiere al tiempo que se espera que permanezca el efecto desde su aparición. Puede expresarse en unidades de tiempo, generalmente años, y suele considerarse que es Fugaz si permanece menos de un año, el Temporal si lo hace entre uno y diez años, y el Permanente si supera los diez años. La persistencia no es igual que la reversibilidad ni que la recuperabilidad, conceptos que se presentan más adelante, aunque son conceptos asociados: Los efectos fugaces o temporales siempre son reversibles o recuperables; los efectos permanentes pueden ser reversibles o irreversibles, recuperables o irrecuperables.

Reversibilidad

Se refiere a la posibilidad de reconstruir el factor afectado por medios naturales, y en caso de que sea posible, al intervalo de tiempo que se tardaría en lograrlo que si es de menos de un año se considera el Corto plazo; entre uno y diez años se considera el

Medio plazo, y si se superan los diez años se considera Irreversible.

Sinergia

Se dice que dos efectos son sinérgicos si su manifestación conjunta es superior a la suma de las manifestaciones que se obtendrían si cada uno de ellos actuase por separado (la manifestación no es lineal respecto a los efectos). Puede visualizarse como el reforzamiento de dos efectos simples; si en lugar de reforzarse los efectos se debilitan, la valoración de la sinergia debe ser negativa.

Acumulación

Si la presencia continuada de la acción produce un efecto que crece con el tiempo, se dice que el efecto es acumulativo.

Relación Causa-Efecto

La relación causa-efecto puede ser directa o indirecta: es Directa si es la acción misma la que origina el efecto, mientras que es indirecta si es otro efecto el que lo origina, generalmente por la interdependencia de un factor sobre otro; A manera de ejemplo podríamos imaginar que el aumento de temperatura del agua causa la disminución de cierta variedad de peces (efecto directo o primario) y esto a su vez incide en la economía de alguna población pesquera cercana (efecto indirecto o secundario).

Periodicidad

Se refiere a la regularidad de la manifestación del efecto, pudiendo ser periódico, continuo, o irregular.

Recuperabilidad

Se refiere a la posibilidad de reconstruir el factor afectado por medio de la intervención humana (la reversibilidad se refiere a la reconstrucción por medios naturales).

Análisis Cualitativo global

Una vez calculada la Importancia de cada uno de los Impactos, y consignados estos valores en la Matriz de Importancia, se procede al análisis del proyecto en su conjunto; para ello se efectúa, como paso preliminar, una depuración de la matriz, en la que se eliminan aquellos impactos:

- irrelevantes, es decir aquellos cuya importancia está por debajo de un cierto valor umbral
- que se presentan sobre factores intangibles para los que no se dispone de un indicador adecuado. La metodología crisp especifica que estos efectos deben contemplarse en forma separada, pero pese a ello no se aclara en qué forma debe hacerse; estos efectos no se incluyen en la matriz depurada porque la metodología crisp no tiene herramientas adecuadas para su análisis.
- extremadamente severos, y que merecen un tratamiento específico. Generalmente se adoptan alternativas de proyecto en donde no se presenten estos casos, por esta razón al eliminarlos no se está sesgando el análisis cualitativo global.

El paso siguiente es la valoración cualitativa del Impacto Ambiental Total, que se obtiene mediante un análisis numérico de la Matriz de Importancia depurada consistente de sumas, y sumas ponderadas por UIP de las importancias. Las sumas se realizan por filas y por columnas. Nuevamente se observa que la valoración cualitativa de la metodología crisp consiste en un tratamiento cuantitativo basado en números enteros.

La suma ponderada por columnas permitirá identificar las acciones más agresivas (valores altos negativos), las poco agresivas (valores bajos negativos) y las beneficiosas (valores positivos). Las sumas ponderadas por filas permitirán identificar los factores más afectados por el proyecto. Al comparar los resultados que se obtienen en Situaciones diferentes, podrá hacerse una valoración cualitativa de las distintas alternativas de proyecto.

1.2.2 Valoración Cuantitativa

En la fase de Valoración Cuantitativa la información obtenida en la Valoración Cualitativa se complementa con estudios técnicos más detallados; estos estudios deben permitir hacer una predicción numérica de cada uno de los impactos individuales (a diferencia de la predicción lingüística empleada en la fase previa), que luego deberá agruparse para obtener una predicción numérica del impacto total. Esta predicción numérica se transforma en unas variables intangibles adimensionales denominadas Calidad Ambiental y Valor Ambiental que, por ser intangibles, deberían ser tratadas de forma cualitativa. Sin embargo, la metodología crisp no cuenta con las herramientas adecuadas para ello.

Indicadores ambientales y Magnitud de los impactos

Un Indicador de un factor ambiental es una variable que permite medir dicho factor. En algunas ocasiones la determinación del indicador adecuado para un factor es más o menos obvia (por ejemplo para el factor Fosfatos en el agua el indicador será la concentración de fósforo en el agua), pero en muchas otras no lo es, principalmente por dos razones:

- El factor sólo es cuantificable de forma indirecta, en cuyo caso pueden existir varios indicadores candidatos para medir un mismo factor.
- No se encuentra un indicador cuantificable, y es necesario recurrir a parámetros cualitativos, que pueden ser valorados subjetivamente.

Las unidades de medida de cada indicador estarán determinadas por el propio indicador, y por lo tanto cada factor será medido en unidades diferentes.

La Magnitud de un impacto es la estimación cuantitativa del efecto que éste tendrá sobre el factor ambiental, medida según el valor que se espera que tome el indicador de dicho factor. Esta estimación debe ser desarrollada por especialistas en el factor correspondiente, y generalmente está apoyada en modelos matemáticos del sistema físico estudiado. La magnitud del impacto suele registrarse en la misma matriz de importancia.

Agregación de Magnitudes por Efecto

Un mismo factor puede ser impactado simultáneamente por varias acciones. La magnitud del impacto total recibido por ese factor es la Agregación de las magnitudes de los impactos individuales. De lo anterior se desprende que

$$M_i = Ag_i (M_{i1}, \dots, M_{ij}, \dots, M_{im})$$

donde M_i es la magnitud del impacto total recibido por el factor F_i , M_{ij} la magnitud del impacto producido por la acción A_j sobre el Factor F_i , Ag_i es la función de agregación del factor F_i , y se han supuesto m acciones impactantes. La forma de la función de agregación Ag_i depende del factor considerado; algunos ejemplos son los siguientes:

- Sin Sinergia $M_i = \sum_{j=1}^m M_{ij}$
- Con sinergia lineal, $M_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} + \sum_{k=j+1}^m S(M_{ij} + M_{ik})$ donde $S_{i,j}$ es el coeficiente de sinergia del factor F_i .
- Con sinergia potencial, $M_i = k^{r-1} \sum_{j=1}^m M_{ij}$ donde K es el coeficiente de sinergia ($K > 1$) y r es el número de acciones impactantes ($r \leq n$). Si $K > 1$ existe sinergia positiva, en caso contrario se trata de sinergia negativa, o debilitamiento.
- Logarítmica: La contaminación auditiva se mide en decibelios, que son una función de la intensidad sonora I_{sij} : $M_{ij} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{sij}}{I_{S_0}} \right)$ donde I_{S_0} es un nivel de referencia. De la expresión anterior se deduce que

$$IS_{ij} = IS_o (10) \left(\frac{M_o}{10} \right).$$

Las Intensidades sonoras se agregan sin sinergia (mediante una suma), es decir,

$$M_i = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{j=1}^m IS_{ij}}{IS_o} \right) \text{ y por tanto } M_i = 10 \log_{10} \left[\sum_{j=1}^m \frac{M_j}{10} \right].$$

Calidad Ambiental y Funciones de Transformación

Mediante las funciones de agregación se puede obtener la magnitud del impacto total recibido por cada factor, pero este impacto estará medido en las unidades características de cada factor, y por lo tanto no es posible comparar los impactos recibidos por factores diferentes. Para poder hacer esa comparación, se emplean las Funciones de Transformación, que permiten referir a una escala común, denominada Calidad Ambiental, las magnitudes de los impactos recibidos por cada factor. Las funciones de transformación son de la forma $CA_i = U_i \rightarrow [0,1]$, donde CA_i es la función de transformación del factor F_i , U_i es el espacio sobre el que están medidas las magnitudes de los impactos recibidos por el factor F_i , y $[0,1]$ es el intervalo unitario, en el que se medirá la Calidad Ambiental (adimensional). Se asigna el valor 0 a la situación ambiental más desfavorable, y 1 a la situación óptima.

La forma de la función CA_i dependerá del factor considerado, y su determinación es una de las tareas más complejas de la Evaluación de Impacto Ambiental, ya que propuesta sobre la forma de medir la Calidad Ambiental puede variar sensiblemente de un autor a otro. Existen 9 formas básicas de funciones de transformación como se muestra en la Figura 1.3, funciones lineales o curvas, con pendiente positiva o negativa, o bien conteniendo un punto máximo o mínimo intermedio.

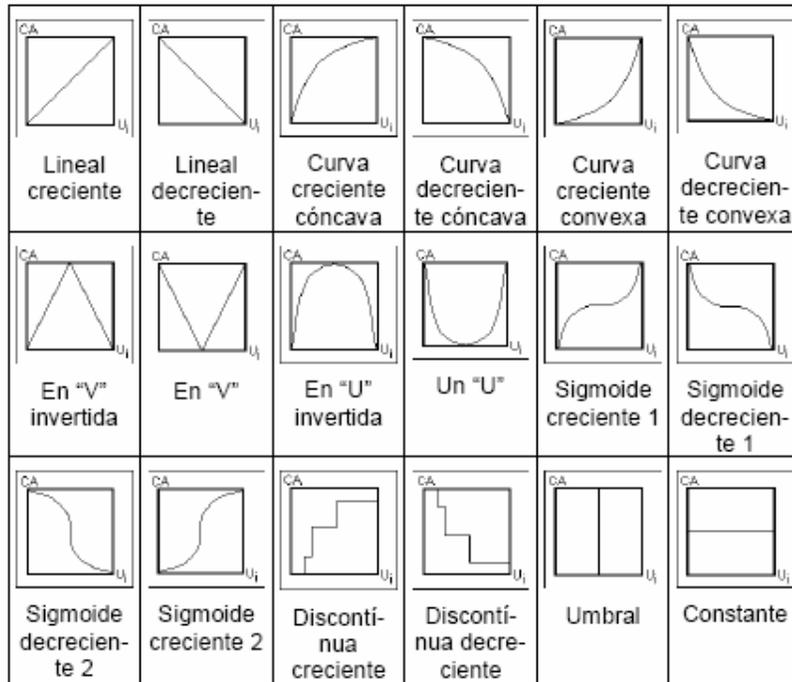


Figura 1.3: Ejemplos de Funciones de transformación

El Impacto causado por el proyecto sobre un factor determinado puede medirse empleando la noción de Calidad Ambiental Neta, que se define como la diferencia en la calidad ambiental asociada a ese factor en dos situaciones diferentes: Con el proyecto y Sin el proyecto. La forma de calcularla es la siguiente:

$$CA_{NETA-i} = CA_{CON-i} - CA_{SIN-i}$$

$$CA_{CON-i} = CA_i(M_{CON-i})$$

$$CA_{SIN-i} = CA_i(M_{SIN-i})$$

donde CA_{NETA-i} es la calidad ambiental neta del factor F_i ; CA_{CON-i} es la calidad ambiental del factor F_i con el proyecto y CA_{SIN-i} sin él; CA_i es la función de transformación del factor F_i ; M_{CON-i} y M_{SIN-i} son las magnitudes del impacto total recibido por el factor F_i con el proyecto y sin él respectivamente.

Valor del Impacto sobre un Factor

El Valor del impacto recibido por un factor determinado es una medida que combina la importancia y la calidad ambiental neta de ese impacto. Se calcula como:

$$\begin{aligned} |V_i| &= (a_i b_i)^{1/3} \\ a_i &= \frac{|I_{F_i}|}{\max_{k=1 \dots n} (|I_{F_k}|)} \\ b_i &= (CA_{\text{neto-}i})^2 \\ \text{sig}(V_i) &= \text{sig}(I_{F_i}) \end{aligned}$$

donde V_i denota el valor del impacto recibido por el factor F_i , I_{F_i} es la importancia de ese impacto y $CA_{\text{neto-}i}$ es su calidad ambiental neta; a_i y b_i son variables auxiliares; y además $| \cdot |$ y $\text{sig}(\cdot)$ son los operadores de valor absoluto y signo respectivamente. Tanto a_i como b_i pueden tomar valores en el intervalo $[0,1]$, y por lo tanto V_i tomará valores en el intervalo $[-1,1]$.

Análisis Cuantitativo global

El Impacto Ambiental Total (IAT) se calcula como la suma ponderada de los valores de los impactos recibidos por cada factor, donde la ponderación se hace mediante las unidades de importancia (UIP) de cada factor. Así pues,

$$IAT = \sum_{i=1}^n P_i V_i$$

donde IAT es el Impacto Ambiental Total, P_i son las unidades de importancia del factor F_i y V_i es el valor del impacto recibido por el mismo factor F_i .

El IAT estima globalmente lo severo que es el efecto del proyecto sobre el medio ambiente. Como la suma de todos los factores de ponderación P_i es 1000, entonces el IAT puede tomar valores en el intervalo $[-1000,+1000]$, siendo los proyectos más severos aquellos cuyo Impacto Ambiental Total se acerque a -1000 , y los más beneficiosos aquellos que se acerquen a $+1000$. El IAT debe calcularse para las distintas

alternativas que se consideren, incluyendo el efecto de las medidas correctoras que se incorporen en cada caso. Mediante la comparación directa entre los IAT de distintas alternativas se podrá determinar cuál de ellas es la mejor desde el punto de vista de su impacto ambiental.

1.3 Otras metodologías para la Identificación y Valoración del Impacto Ambiental.

Actualmente existen numerosos métodos para llevar a cabo el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, aunque tienen un mismo objetivo general, emplean estrategias diferentes. Muchos de estos han sido desarrollados con objetivos muy específicos, por lo que en ocasiones se ha hecho difícil que sean generalizados a proyectos con una naturaleza diferente al que dio origen a alguno de estos métodos.

Estas metodologías, se agrupan, por sus características, teniendo en cuenta diversos criterios según determinados autores. En [51] son clasificadas en tres grandes grupos: modelos de identificación (listas de verificación causa-efecto ambientales, cuestionarios, matrices causa-efecto, matrices cruzadas, diagramas de flujo, otras), modelos de previsión (empleo de modelos complementados con pruebas experimentales y ensayos “in situ”, con el fin de predecir las alteraciones en magnitud), y modelos de evaluación (cálculo de la evaluación neta del impacto ambiental y la evaluación global de los mismos).

Por su parte, en [33] se diferencian dos grandes grupos de técnicas para la evaluación de impactos: métodos tradicionales para la evaluación de proyectos y métodos cuantitativos. Los primeros corresponden a técnicas que hacen sus mediciones en términos monetarios (caso relación Beneficio/Costo), cuya principal limitante es la dificultad que representa el establecer valoración económica a los distintos factores que definen la calidad del medio (polución, aire, contaminación de aguas, etc.).

Los métodos cuantitativos consisten en la aplicación de escalas valorativas para los diferentes impactos, medidos originalmente en sus respectivas unidades físicas. En estos se diferencian dos grupos, el primero permite la identificación y síntesis de los impactos (listas de chequeo, matrices, redes, diagramas, métodos cartográficos), y un

segundo grupo incorpora, de forma más efectiva, una evaluación pudiendo explicitar las bases de cálculo (Batelle, hoja de balance y matriz de realización de objetivos).

Se tienen además métodos integrales que hacen posible la valoración cualitativa y cuantitativa de los impactos ambientales, mediante adopción y medición de indicadores ambientales y funciones de transformación que permiten su comparación directa.

En [13], se realiza esta diferenciación de las metodologías:

Sistemas cartográficos

- Superposición de transparentes
- Mc Harg
- Tricart
- Falque
- Análisis de sistemas
- Métodos basados en indicadores, índices e integración de la evaluación
- Holmes
- Universidad de Georgia
- Hill-Schechter
- Fisher-Davies

Métodos basados en indicadores, índices e integración de la evaluación

- Holmes
- Universidad de Georgia
- Hill-Schechter
- Fisher-Davies

Sistemas de red y gráficos

- Matrices de causa-efecto; Leopold

- Cuestionarios
- Diagramas de flujo
- Redes
- Listas de chequeo
- CNYRPAB
- Bereano
- Sonrensen
- Guías Metodológicas del MOPU
- Banco Mundial
- Calificación Ambiental
- Modelos Integrales

Métodos cuantitativos

- Batelle-Columbus

Para la Evaluación de Impacto Ambiental, en dependencia del proyecto que se pondrá en marcha, según el tipo de EIA que este requiera se debe hacer una selección entre las metodologías de evaluación existentes, para su utilización o para ser redefinidas con el fin de hacerla más específica para el proyecto en cuestión.

Un primer criterio a incluir en la selección es definir si se necesita medir la capacidad de una variable del ambiente o el impacto que sobre ella se genera. Un segundo elemento se relaciona con su comportamiento en el tiempo. Por ejemplo, se considera a la naturaleza como un estado de equilibrio que es ocasionalmente perturbado por eventos propios o inducidos. Esta percepción obedece, probablemente, a que los cambios ecológicos acontecen en escalas temporales mayores que las humanas. Esto introduce una complicación adicional en la utilización de técnicas y métodos ya que las perturbaciones ambientales ocasionadas por un proyecto y sus efectos sobre el medio ambiente deben compararse no tan sólo con la situación inicial, previa a la acción, sino que con los posibles estados del sistema de acuerdo a las dinámicas de cambio natural.

Para la obtención de la información requerida en las evaluaciones ambientales destaca la utilización de metodologías y técnicas de medición, ya que con ellas es posible realizar adecuadamente una predicción, identificación e interpretación del impacto en los diferentes componentes del medio ambiente.

La medición de las variables ambientales específicas establece el desafío de seleccionar métodos y técnicas en función del ambiente afectado, de los tipos de acciones que se emprendan, de los recursos disponibles y de la calidad de la información, entre otros aspectos.

En relación a evaluar impactos ambientales, la explosión de métodos de medición surge a fines de los años 60. El ya clásico procedimiento de la matriz de LEOPOLD para la identificación, análisis y evaluación de impactos ambientales se publica en 1971. Desde entonces una larga serie de experiencias metodológicas ha sido desarrollada en la lógica de la evolución de toda herramienta incipiente. El punto crucial en las metodologías de estudios de impacto ambiental es la medición de los aspectos cualitativos. La estimación y el valor de un área en que viven especies animales o vegetales en peligro de extinción, o el establecimiento de las modificaciones en las cadenas tróficas, son problemas que muchas veces sólo pueden ser resueltos con la cualificación de variables.

La utilización de métodos para identificar las modificaciones en el medio es una tarea relativamente fácil. Pero otra cosa es la calificación de esas modificaciones: todos los aspectos y parámetros pueden medirse; la dificultad está en valorarlos. Saber que el gas organoclorado freón de los aerosoles destruye el ozono de la estratosfera y medir, incluso, su tasa de disminución, es un aspecto. Otra cosa es medir la importancia y los impactos desencadenados por esta destrucción.

Ninguna metodología es la mejor per se ante otras. La combinación de ellas casi siempre resulta más útil en la EIA. Los factores que influyen en la selección se vinculan con [26]:

- El tipo y tamaño de la propuesta

- Las alternativas
- La naturaleza de los impactos
- La adecuación al ambiente afectado
- La experiencia del equipo de trabajo
- Los recursos disponibles (información, especialistas, etc)
- La experiencia del proponente
- La limitación y/o procedimientos administrativos
- La participación ciudadana
- La seguridad de adecuarse a la situación específica

A continuación se hace una descripción de algunas de estas metodologías.

Sistemas Cartográficos

Superposición de transparentes

Se desarrollaron en el ámbito de la planificación territorial para la evaluación de los impactos ambientales de uso del territorio. También se les conoce como métodos de transparencias y gráficos. Básicamente consisten en la superposición -sobre un mapa del área de estudio, convenientemente subdividida- de transparencias dedicadas a un factor ambiental e identificadas con códigos (color, números, otros) que indican el grado de impacto previsible de cada subzona en caso de llevarse a cabo un proyecto o actividad. La gradación de tonos de color se utiliza para dar idea de la mayor o menor magnitud del impacto [51].

Este método es especialmente útil cuando existen variaciones espaciales de los impactos, de las que no dan cuenta las matrices. Adquieren relevancia en el ámbito local, en particular cuando se trata de relacionar impactos ambientales localizados con indicadores de salud o características socioeconómicas espacialmente diferenciadas. Son singularmente útiles para la evaluación de rutas alternativas en desarrollos lineales como ductos, carreteras y líneas de transmisión.

Sin embargo, su mayor limitación deriva precisamente de su ventaja, o sea que

solamente considera algunos impactos limitados que puedan expresarse en coordenadas espaciales. Elementos como probabilidad, dinámica y reversibilidad están ausentes. La definición de los límites o las fronteras de alcance de los impactos es normalmente poco clara y no se puede sobreponer una gran cantidad de variables.

El alto grado de versatilidad y desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) permiten hoy día darle mayor aplicación a esta metodología. Las técnicas cartográficas pueden ser buenas herramientas de comunicación, especialmente en estudios del medio físico; son de gran utilidad en las reuniones con el público y en actividades para la difusión o aclaración de conceptos a éste en el proceso de planificación.

Método de Mc Harg

Es el precursor de la planificación ecológica, mediante el establecimiento de mapas de aptitud del territorio para los diversos usos.

Parte de una descripción ecológica del lugar, tratando de evaluar las posibilidades de ordenación o planificación y las consecuencias de estas sobre el medio ambiente, preocupándose especialmente de que los procesos biológicos consten como criterios restrictivos y orientadores en la planificación territorial.

Consiste este método en hacer un inventario masificado de los siguientes factores: clima, geología, histórica, fisiografía, hidrología, suelos, flora, fauna y uso actual del suelo.

Seguidamente se interpretan los datos del inventario en relación con las actividades o acciones objeto de la localización y se traduce en mapas específicos para cada una de las actividades, que son fundamentalmente agrícola, recreo, silvicultura y uso urbano, atribuyendo valores a los procesos.

Comparando los usos de los objeto de localización entre si, se obtiene una matriz de incompatibilidades y se sintetizan estos datos en el mapa de capacidad o adecuación.

También realiza paralelamente un inventario económico y de visualización del paisaje que, junto con la matriz de adecuación, permite a la autoridad competente instrumentar la planificación.

Método de Tricart

El objetivo principal de este método es recoger una serie de datos y conocimientos científicos para comprender la dinámica del medio natural y destacar las zonas y factores que pueden limitar determinados usos del territorio.

Se opera mediante la interacción dinámica entre procesos y sistemas previamente identificados, analizados y localizados.

La base informativa de este método la constituye la cartografía de todos los elementos naturales (relieve, cubierta vegetal, hidrología,...) resultando bastante útil para la ordenación de recursos hídricos.

Planificación Ecológica de M. Falque

Método similar al ideado por Mc Harg diferenciándose únicamente en una descomposición más amplia del análisis ecológico del territorio.

Análisis de sistemas

Estos tipos de métodos pretenden tener una representación del modo de funcionamiento global del sistema hombre-ambiente.

El análisis sistemático que conlleva, debe definir el objetivo a alcanzar para conseguir la resolución del problema, así como las soluciones alternativas para alcanzar los objetivos [30].

Las soluciones alternativas se introducen en un cuadro formalizado que al final nos dará la solución óptima.

Métodos basados en indicadores, índices e integración de la evaluación

Método de Holmes

Este método se basa en el hecho de que muchos de los parámetros utilizados para los estudios medioambientales no son cuantificables, con lo cual, el empleo de indicadores numéricos no es válido. Así pues, la evaluación vendrá dada por un juicio subjetivo de un equipo evaluador.

Los factores ambientales se clasifican por orden de importancia, se comparan cualitativamente las variantes o alternativas del proyecto por medio de un parámetro previamente seleccionado y se selecciona la mejor alternativa en función de su importancia y de su posición respecto a los factores ambientales.

Método de la Universidad de Georgia

Consiste en agregar los valores de 56 componentes ambientales, marcando así su importancia relativa.

Para cada componente se emplean dos valores, uno para la situación presente y otro para la futura.

Permite considerar simultáneamente el presente y el futuro, así como soluciones alternativas. Facilita, asimismo, una mejor intervención pública mediante la que se determina el peso o valor de los componentes ambientales.

Método de Hill- Schechter

Este método parte de una reflexión crítica de los métodos de análisis costo-beneficio, estimando que no permiten integrar todos los elementos y en particular los efectos intangibles.

Este análisis trata de evaluar y sopesar globalmente los beneficios y costes sociales, reducidos a valores actuales, que se derivaran de una o varias opciones.

Dicha evaluación de costes y beneficios se hace normalmente con ayuda de precios ficticios o imputados para aquellos bienes y servicios que no tienen un mercado que los fije, como es el caso de los bienes y servicios medioambientales.

No obstante, se puede prescindir de ellos si los costes y los beneficios admiten directamente comparaciones que permitan obtener conclusiones sin necesidad de valorarlos en unidades monetarias.

Método de Fisher-Davies

Con este método se pretende evaluar los impactos ambientales en el marco de un proceso integrado de planificación

El método consta de tres etapas:

I. La evaluación de la situación de referencia o preoperacional, es una medida de la degradación del ambiente, puntuando de 1 a 5 de forma subjetiva según juicio de un equipo evaluador multidisciplinar y de acuerdo con la importancia del parámetro medioambiental.

II. La matriz de compatibilidad relaciona los elementos considerados importantes en la fase precedente y las acciones derivadas del proyecto. Se califica también de 1 a 5 cada casilla de interacción precedida del signo + o – según el impacto sea positivo o negativo. Esta matriz ha de hacerse para cada una de las alternativas.

III. La matriz de decisión reagrupa los valores atribuidos a los elementos importantes en las diversas alternativas. A la vista de esta matriz se adoptarán las decisiones correspondientes al proyecto estudiado.

Sistemas de red y gráficos

Matrices causa-efecto

Son métodos cualitativos, preliminares y muy valiosos para valorar las diversas alternativas de un mismo proyecto, describiéndose a continuación el más conocido: el de la Matriz de Leopold.

Fue el primer método que se estableció para las evaluaciones de impacto ambiental.

Este método consiste en una matriz en la que se disponen como filas los factores ambientales que pueden ser afectados y como columnas las acciones que vayan a tener lugar y que serán causa de los posibles impactos.

En este método se fijan como número de acciones posibles 100, y 88 el número de factores ambientales, con lo que el número de interacciones posibles será de $88 \times 100 = 8800$, aunque conviene destacar que, de estas, son pocas las realmente importantes, pudiendo construir posteriormente una matriz reducida con las interacciones más relevantes, con lo cual resultará más cómodo de operar ya que no excederán las 50.

Cada cuadrícula de interacción se dividirá diagonal, haciendo constar en la parte superior la magnitud M (extensión del impacto) precedido del signo + o -, según el carácter del impacto, en una escala del 1 al 10 (asignando el valor 1 a la alteración mínima y el 10 a la máxima)

En el triángulo inferior constará la importancia, I (intensidad o grado de incidencia) también en la escala del 1 al 10 ambas estimaciones se realizan desde un punto de vista subjetivo al no existir criterios de valoración, pero si el equipo evaluador es multidisciplinar, la manera de operar será bastante objetiva en el caso en que los estudios que han servido como base presenten un buen nivel de detalle y se haya cuidado la independencia de juicio de los componentes de dicho equipo.

La sumatoria por filas nos indicará las incidencias del conjunto sobre cada factor ambiental y por tanto, su fragilidad ante el proyecto. La suma por columnas nos dará una valoración relativa del efecto que cada acción producirá en el medio y por tanto su agresividad.

La matriz se convierte en un resumen y en el eje del Estudio de Impacto Ambiental adjunto a la misma, que nos sirvió de base a la hora de evaluar la magnitud y la importancia.

Es importante destacar que se deben evitar duplicaciones de las interacciones obtenidas en la matriz, ya que se nos puede presentar la misma interacción con distinto nombre, enmascarada como otra distinta, haciendo que se estudie por duplicado una misma interacción.

Cuestionarios

Se trata de un conjunto de preguntas sistemáticas sobre categorías genéricas de factores ambientales. Normalmente hay tres respuestas dependiendo de cuánto se sabe del impacto específico. Se puede así estimar hasta qué punto se cuenta con información sobre los impactos: SÍ, NO y No Sabe. Por agregación de respuestas se puede tener una idea cualitativa de la importancia relativa de un cierto impacto, tanto negativo como positivo. El análisis ambiental de un proyecto consiste entonces en un procedimiento sistemático de preguntas y respuestas con la adición de información cuantitativa y cualitativa, si es necesario.

Las ventajas de las listas de chequeo están dadas por su utilidad para:

- a) estructurar las etapas iniciales de una evaluación de impacto ambiental,
- b) ser un instrumento que apoye la definición e los impactos significativos de un proyecto,
- c) asegurar que ningún factor esencial sea omitido del análisis, y
- d) comparar fácilmente diversas alternativas de proyecto.

Entre sus deficiencias o limitaciones se encuentran:

a) ser rígidos, estáticos, unidimensionales, lineales y limitados para evaluar los impactos individuales;

b) no identifican impactos indirectos, ni las probabilidades de ocurrencia, ni los riesgos asociados con los impactos;

c) no ofrecen indicaciones sobre la localización espacial del impacto; y d) no permiten establecer un orden de prioridad relativa de los impactos.

Diagramas de flujo

Estas metodologías se utilizan para establecer relaciones de causalidad, generalmente lineales, entre la acción propuesta y el medio ambiente afectado. También son usados para discutir impactos indirectos. La aplicación se hace muy compleja en la medida en que se multiplican las acciones y los impactos ambientales involucrados. Por eso su utilización se ha restringido y es útil cuando hay cierta simplicidad en los impactos involucrados.

Los diagramas de flujo tienen las ventajas de ser relativamente fáciles de construir y de proponer una relación de causalidad que puede ser útil. Sin embargo, no facilitan la cuantificación de impactos y se limitan a mostrar relaciones causa-efecto de carácter lineal. Como metodologías de evaluación de impacto ambiental, los diagramas de flujo son estrictamente complementarios con las matrices y otras alternativas utilizadas.

Redes

Las redes son una extensión de los diagramas de flujo a fin de incorporar impactos de largo plazo. Los componentes ambientales están generalmente interconectados, formando tramas o redes y a menudo se requiere de aproximaciones ecológicas para identificar impactos secundarios y terciarios. Las condiciones causantes de impacto en una red son establecidas a partir de listas de actividades del proyecto.

El desarrollo de una red requiere indicar los impactos que resultan de cada actividad del proyecto. Se utilizan, en orden jerárquico, los impactos primarios, los impactos secundarios y terciarios, y así sucesivamente hasta obtener las interacciones respectivas.

Las redes son útiles como guías en el trabajo de evaluación de impactos ambientales para detectar impactos indirectos o secundarios; en proyectos complejos o con muchas componentes pueden ser muy importantes para identificar las interacciones mutuas. Además proporcionan resúmenes útiles y concisos de los impactos globales de un proyecto.

Su principal desventaja es que no proveen criterios para decidir si un impacto en particular es importante o no. Cuando la red es muy densa, se genera confusión y dificultad para interpretar la información.

Uno de los métodos más conocidos es el de Sorensen, elaborado en 1971 para analizar diversos tipos de uso del suelo en regiones costeras. Se trata principalmente de una técnica de identificación de efectos, que parte de la caracterización de diferentes usos del suelo, los cuales se desdoblan o explican en diversos factores causales, que a su vez implican impactos ambientales clasificados en: Condiciones iniciales-Consecuencias-Efectos. Además de presentar una red compuesta de diversos grupos de efectos, el método indica igualmente acciones correctivas y mecanismos de control.

Listas de chequeo, control o verificación

Son relaciones categorizadas o jerárquicas de factores ambientales a partir de las cuales se identifican los impactos producidos por un proyecto o actividad específica. Existen listas de chequeo elaboradas según el tipo de proyecto, haciendo identificación expresa de los elementos del medio que en forma particular resultan impactados por las actividades desarrolladas en el marco del mismo. Además de permitir la identificación, bien podría asimismo incorporar escalas de valoración y ponderación de los factores.

Existen diversos tipos de listados; entre ellos destacan:

- **Listados simples.** Contienen sólo una lista de factores o variables ambientales con impacto, o una lista de características de la acción con impacto, o ambos elementos. Permiten asegurarse que un factor particular no sea omitido del análisis. Son más que nada una ayuda-memoria.
- **Listados descriptivos.** Estos listados dan orientaciones para una evaluación de los parámetros ambientales impactados. Se indican, por ejemplo: posibles medidas de mitigación, bases para una estimación técnica del impacto, referencias bibliográficas o datos sobre los grupos afectados.
- **Listados escalonados.** Se establecen criterios para evaluar un conjunto de elementos ambientales, comparando sus Valores Mínimos Aceptables (VMA), establecidos por las normas y criterios de calidad ambiental, y las Variaciones de su Valor (VV) ante tres alternativas del proyecto: Sin Acción (SA), con Inversión Media (IM) y con Inversión Grande (IG). Para cada caso se indica si hay o no Impacto Ambiental Negativo (IAN). Se trata de un caso ilustrativo y las unidades de los criterios deben ser adaptadas a cada situación.

En la metodología propuesta en este trabajo se empleará las Listas de Chequeo Simple para la etapa de identificación de impactos.

Método del CNYRPAB (Departamento de Desarrollo y Planificación Regional del Estado de Nueva York)

Es un método de identificación de los impactos que ocasiona un proyecto, obra o actividad.

Se utilizan dos matrices, la primera de las cuales es semejante a la de Leopold, en la que se relacionan las condiciones iniciales del ambiente y el estado de los recursos naturales con las posibles acciones sobre el medio.

Se marcan las cuadrículas a las que corresponde un impacto directo y se les califica con un número de orden.

Estos impactos calificados se interrelacionan entre ellos mediante el empleo de una segunda matriz con objeto de identificar los impactos indirectos.

Se destacan los impactos directos e indirectos que produce una determinada acción y también a la inversa, es decir, se pueden analizar las causas que dan lugar a un impacto dado.

Es estático, ya que no se incluye la variable tiempo.

Método Bereano

Se basa en una matriz para la evaluación de los impactos asociados a las estrategias tecnológicas alternativas. Se comparan alternativas tomando como base ciertos parámetros, seleccionados de manera que reflejen los efectos diferenciales que las distintas alternativas producirán sobre el medio ambiente.

Método de Sorensen

En este método, los usos alternativos del territorio se descomponen en un cierto número de acciones, referidas a las condiciones iniciales del área objeto de estudio, determinando las condiciones finales una vez estudiados los efectos, utilizando para ellos varias tablas y gráficas, es decir:

- Una tabla cruzada: usos-acciones
- Una tabla cruzada: acciones-condiciones iniciales
- Un gráfico:
 - condiciones iniciales-condiciones finales
 - efectos múltiples-acciones correctoras

Es un método dinámico no cuantitativo.

Guías metodológicas del MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo)

La Dirección General del Medio Ambiente, del antiguo MOPU (actualmente Ministerio de Fomento), ha publicado una metodología específica para los casos concretos de construcción de carreteras y ferrocarriles, grandes presas, reprobaciones forestales y aeropuertos teniendo previsto aumentar el número de las mismas dedicadas a otro tipo de actuaciones, estas guías metodológicas parten de una sólida base descriptiva de cada parámetro potencialmente afectable, así como de las acciones causantes de los posibles impactos, es decir, una descripción de la situación preoperacional a la que sigue una previsión de impactos, incluyendo criterios y metodologías de evaluación, en las que se incluyen varias alternativas que pueden ser utilizadas según convenga para el caso en cuestión.

Se hace una evaluación cualitativa (generalmente de tipo matricial) y cuantitativa (generalmente del tipo Batelle) del impacto, a la que sigue una relación de medidas preventivas y correctoras, los posibles impactos residuales y un programa de vigilancia y control.

Método del Banco Mundial

El Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF), más conocido como Banco Mundial, ha estudiado cientos de proyectos para los que se había solicitado su financiación y se incluyó también en esos estudios la variable ambiental.

En esta metodología, los objetivos se fijan en la identificación y medición de los efectos de los proyectos sobre el Medio Ambiente señalando los puntos generales que sirven de base para analizar las posibles consecuencias del proyecto, indicando la información precisa y el tipo de experiencia necesaria que se requieren para estudiar con profundidad los aspectos ambientales de los diferentes proyectos y proporcionando una estructura para la formulación de procedimientos y pautas para el examen y la consideración sistemática de los factores ambientales.

Se realiza una identificación de factores y posibles efectos ambientales para facilitar la toma de decisiones según las alternativas presentadas.

Calificación ambiental

Esta propuesta metodológica, desarrollada por Arboleda (1994), busca identificar y evaluar los impactos generados por la construcción y realización de obras de diferente magnitud, sobre las condiciones medioambientales que pueden resultar afectadas. Ha sido empleada por las Empresas Públicas de Medellín (EPPM) en diversos proyectos, y aprobada por organismos tanto nacionales como internacionales, cuyas funciones se relacionan con el manejo y/o regulación del medio ambiente.

Las principales características de la metodología, son las siguientes:

- Es ágil, confiable, y de fácil comprensión.
- Tiene aplicabilidad en todo tipo de proyecto y para cualquier nivel de información disponible.
- Su desarrollo es de tipo secuencial de forma tal que lo obtenido en una fase, sirve como insumo para la siguiente.
- Puede someterse a ajustes, de acuerdo con las necesidades de cada proyecto.

Modelos integrales para la EIA

Dentro del conjunto de técnicas disponibles para la EIA, se tienen algunas que van más allá de la identificación y cuantificación de impactos; se trata de estructuras formales, que valiéndose de procedimientos estandarizados de tratamiento de la información, permiten en forma sintética identificar, predecir, valorar, e incluso analizar medidas correctoras, de impactos producidos por un proyecto, en una cualquiera de sus fases.

Estos métodos tienen en común el empleo de expresiones matemáticas que, calificando diversos atributos del impacto, conducen a la definición de cada elemento tipo de una matriz que organiza formalmente el proceso evaluativo.

El tratamiento que recibe la información allí consignada, mediante el empleo de

funciones de transformación, trae como ventaja singular la valoración del impacto en unidades comparables o conmensurables, lo cual se indicará más adelante.

Métodos Cuantitativos

Método de Batelle-Columbus.

Fue desarrollado en el laboratorio Batelle-Columbus, por encargo de la Oficina de Reclamaciones del Ministerio del Interior de los Estados Unidos de América para evaluar el impacto de proyectos relacionados con recursos hídricos, aunque también se utiliza en evaluación de proyectos de lineales, plantas nucleares y otros (Batelle Institute 1972). El método es un tipo de lista de verificación con escalas de ponderación que contempla la descripción de los factores ambientales, la ponderación valórica de cada aspecto y la asignación de unidades de importancia. El sistema tiene cuatro niveles:

- Categorías ambientales
 - Componentes ambientales
 - Parámetros ambientales
 - Medidas ambientales

Las categorías representan grandes agrupaciones con dominios similares (ecología, contaminación ambiental, estética, interés para las personas). Los componentes están contenidos en grupos de parámetros similares (agua, aire, suelo, etc.). Los parámetros representan unidades o aspectos significativos del ambiente (ruido, metales, etc.).

Las medidas corresponden a los datos que son necesarios para estimar correctamente un parámetro.

Las variables ambientales son organizadas en 4 categorías, 17 componentes y 78 parámetros ambientales para la evaluación de proyectos hídricos. La importancia relativa de cada variable se asigna a base de un juicio compartido del grupo de expertos con la información obtenida de los actores involucrados (empresa, comunidad, gobierno

local, ONGs, etc.).

Una vez obtenida la lista de variables que respondan a las exigencias que se acaban de detallar, el modelo de Battelle establece un sistema en el que ellas se lleguen a evaluar en unidades comparables, representando valores que, en lo posible, sean el resultado de mediciones reales. Para ello, el método se vale de las denominadas Unidades de Impacto Ambiental (UIA).

En este método se estima la calidad ambiental esperada sin y con proyecto. La diferencia en unidades de impacto ambiental entre las dos condiciones puede resultar:

- Positiva, en cuyo caso la calidad ambiental de la situación con proyecto supera la de la situación sin proyecto, y el impacto global es beneficioso.
- Negativa, en cuyo caso ocurre lo contrario al anterior; la calidad ambiental de la situación con proyecto es menor a la de la situación sin proyecto y el impacto global es adverso.
- Cero, en cuyo caso no existe impacto agregado global.
- Las ventajas más destacadas del método son:
- Los resultados son cuantitativos y pueden ser comparados indistintamente con otros proyectos sin importar su tipo o quiénes lo realizaron.
- Es un método sistematizado para la comparación de alternativas. De alguna manera induce a la decisión, dado que se obtiene la cifra de alteración de calidad ambiental para cada alternativa.
- Algunos destacan la validez del método “para apreciar la degradación del medio como resultado del proyecto, tanto totalmente como en sus distintos sectores”.
- La asignación de pesos se realiza mediante procedimientos del tipo DELPHI, que minimizan la subjetividad de un solo individuo o un grupo dominante.

Las desventajas más notables, en cambio, pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Los índices de calidad ambiental disponibles son los que fueron desarrollados en los Estados Unidos de América, para un medio en particular, por lo que, en rigor, no son válidos para medios distintos.
- El método fue desarrollado para proyectos hidráulicos, lo que significa que se tendría que adaptar cada vez que se trate de analizar un proyecto distinto.
- La lista de indicadores es limitada y arbitraria, sin tener en cuenta las relaciones entre componentes ambientales o las interacciones causa-efecto.

Respecto a las funciones de valor hay que establecer varias cosas:

- Son rígidas y no admiten la consideración del dinamismo de los sistemas ambientales. Los valores de los indicadores pueden oscilar a lo largo del tiempo, tanto para la situación con proyecto como para la situación sin proyecto. Por ejemplo, las poblaciones de animales considerados dentro de la categoría “ecología” varían a lo largo del año. Sin embargo, los valores que se introducen en la función para encontrar la calidad ambiental son únicos.
- Como ya se ha comentado al abordar la etapa correspondiente del método, las funciones de valor pueden dar una sensación errónea de objetividad, cuando en su elaboración pueden haberse introducido factores subjetivos. De hecho, la correspondencia parámetro-valor de la calidad ambiental puede variar de unas sociedades a otras y de unas épocas a otras y, por tanto, siempre existe la componente subjetiva. Sin embargo, ésta puede ser disminuida con un mejor conocimiento del medio y de su comportamiento ante las actuaciones humanas, con el concurso de especialistas en cada componente ambiental.

Hay casos, incluso, en que la componente subjetiva de la función es obvia, como en la relacionada con el paisaje. Aquí es imprescindible un amplio consenso para la elaboración de la misma.

Comentarios a las metodologías crisp

Las metodologías crisp, logran, satisfacen, los requerimientos de una Evaluación de Impacto Ambiental; sin embargo, al analizarlas se evidencian algunas flaquezas, relacionadas fundamentalmente con la manipulación de la incertidumbre propia de la información relacionada con los aspectos medioambientales y que emiten los expertos que realizaran la evaluación, son las siguientes:

- Para calcular la importancia, mediante la formula planteada, se hace uso de etiquetas para variables típicamente cuantitativas como es el caso de la Extensión (cuantificable en porcentaje de área respecto al entorno), o el Momento, la Persistencia y la Reversibilidad (cuantificables en meses). Estas variables numéricas primero se convierten en variables no-numéricas (por ejemplo el Momento se evalúa como inmediato, a medio plazo o a largo plazo), para luego volver a convertirse en variable numérica mediante la asignación de un número asociado a cada etiqueta.
- La etapa de valoración cualitativa consiste en seleccionar unas etiquetas para cada variable, asignarle un valor numérico a cada etiqueta, y luego efectuar sumas y promedios con esos números. Por lo que puede decirse que el modelo lingüístico de la valoración cualitativa se define sobre números enteros.
- Algunas variables que intervienen en el proceso de evaluación, no pueden ser determinadas con absoluta precisión, la metodología no establece ningún procedimiento para tratar variables con incertidumbre.

Todos estos hechos sugieren que estas se mejorarían, en este sentido, significativamente si se construyese sobre un modelo lingüístico más adecuado. Por esta razón nos proponemos la utilización de técnicas difusas.

1.4 Incorporación de técnicas difusas

Hemos podido concluir que el modelo lingüístico de la metodología crisp presenta algunas deficiencias, especialmente porque está basado en números enteros. Este hecho nos sugiere que la metodología crisp se mejoraría significativamente si se construyese sobre un modelo lingüístico más adecuado. Por esta razón se propone en esta memoria la utilización de técnicas difusas.

La capacidad de representación lingüística de los conjuntos difusos ha sido presentada y analizada desde hace varios años. Mediante variables lingüísticas puede obtenerse una representación matemática adecuada de conceptos vagos, es decir, de conceptos que no pueden delimitarse por fronteras exactas; muchas de las variables que se emplean en los estudios de impacto ambiental son de este tipo, lo que sugiere que sean modeladas mediante variables lingüísticas.

En efecto, la variable Importancia de un impacto se califica como Irrelevante, Moderada, Severa o Crítica, y aunque cada una de esas etiquetas tiene un contenido semántico claro, no hay una diferencia nítida entre cada una de ellas. La metodología crisp propone diferenciarlas según una clasificación intervalar, empleando para ello el cálculo de un índice I (ver Capítulo 3):

- Irrelevante o Compatible : $13 \leq I < 25$
- Moderado : $25 \leq I < 50$
- Severo : $50 \leq I < 75$
- Crítico : $75 \leq I$

Esta clasificación adolece del mismo problema que adolecen todas las clasificaciones intervalares de conceptos vagos: supóngase dos impactos cuyos índices de importancia sean 49 y 51, respectivamente ¿podemos realmente considerar que sean tan diferentes como para asignarles dos etiquetas diferentes (“moderado” y “severo”)?.

Si por el contrario, definimos la importancia de un impacto mediante una variable lingüística con las mismas cuatro etiquetas, pero representadas, por ejemplo,

por los conjuntos difusos que se muestran en la Figura 1.4, se eliminarían estos cambios bruscos.



Figura 1.4: Ejemplo de variable lingüística para la Importancia de un impacto.

Dentro de las variables involucradas en los estudios de impacto ambiental, la Importancia no es la única que se define con conceptos vagos; todo lo contrario, la gran mayoría de ellas lo son.

Las variables Intensidad, Sinergia, etc. Están definidas sobre conceptos vagos (Intensidad baja, muy sinérgico, etc.); y aún las variables empleadas en la “valoración cuantitativa” Calidad Ambiental, Valor de un Impacto, se representan mejor con variables lingüísticas.

Sin embargo, existen otras variables cuya representación con números crisp parecería, al menos en principio, adecuada. Tal es el caso de la magnitud de un impacto, que se mide empleando indicadores asociados a los factores impactados (por ejemplo la concentración de monóxido de carbono en el aire). En todo caso, no hay que olvidar que en los estudios de impacto ambiental se efectúa una predicción que puede ser imprecisa. En estos casos la representación crisp es insuficiente para modelar la imprecisión.

Además, aún la magnitud de un impacto puede estar definida de forma vaga, ya que para algunos factores ambientales no es posible encontrar un indicador medible (por ejemplo para el valor histórico del entorno).

Por su parte, los números difusos, que son un subconjunto (crisp) de los Conjuntos Difusos, permiten modelar adecuadamente valores numéricos en los que

exista incertidumbre. Esto también justifica de forma fehaciente la incorporación de técnicas difusas en los estudios ambientales.

Debe decirse también, que los números difusos son una extensión de los números crisp, de tal manera que al reemplazar números crisp por números difusos en los estudios ambientales, aquellas variables cuya representación crisp sea adecuada, podrán seguir siendo representadas de esa forma.

1.4.1 Investigaciones desarrolladas que incorporan técnicas difusas.

Varios investigadores han desarrollado estudios relacionados con la aplicación de Técnicas Difusas a la Evaluación de Impacto Ambiental, desarrollando metodologías para diferentes proyectos.

Estas investigaciones tienen como característica común que se valen de las herramientas para modelar conceptos vagos o inciertos que provee la Teoría de Conjuntos Difusos para las variables que intervienen en el proceso de evaluación ambiental. Tienen como antecedentes la metodología matricial desarrollada por Vicente Conesa, muy empleada en España. Además estos autores desarrollan una herramienta que implementa la metodología que proponen, y sirve de ayuda a los expertos en medio ambiente para realizar sus evaluaciones.

Modelo Difuso de Evaluación de Impacto Ambiental de Oscar Duharte

En el 2002 el ingeniero colombiano Oscar Duharte Velasco [19], conjuntamente con investigadores de la Universidad de Granada, España, desarrolló una metodología para los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental, con el objetivo de, en primer lugar, incorporar en los Estudios de Impacto Ambiental la posibilidad de definir variables con incertidumbre, además que sea posible manipular en un marco unificado las variables de tipo numérico y lingüístico. También desarrolló una metodología que permite caracterizar las medidas correctoras que deben tomarse para mitigar el valor del impacto ambiental de un proyecto determinado.

En su investigación Duharte, además, elabora un modelo de computación con

palabras basado en aritmética difusa, donde emplea algoritmos para la extensión de las funciones crisp a números difusos.

Esta metodología fue creada fundamentalmente para el desarrollo de evaluaciones de impacto en proyectos de construcción de carreteras.

Estudio de Impacto Ambiental difuso de José Manuel Martín Ramos

Esta investigación fue desarrollada por el ingeniero José Manuel Martín Ramos, de la Universidad de Huelva, España [36]. En su trabajo se encaminó hacia dos vertientes, primeramente la aplicación de métodos de ayuda a la toma de decisiones a los problemas de los estudios de impacto ambiental, que manipulen de forma indiferente tanto información cualitativa que cuantitativa y permitan seleccionar entre alternativas de proyectos, en dependencia del resultado de la evaluación de impacto.

La otra línea fundamental de esta investigación es el desarrollo de la metodología que incluye la aplicación de Técnicas Difusas a los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental, conjuntamente con los Métodos Difusos de Decisión Multicriterio.

La metodología, aunque puede ser empleada en proyectos de diferente naturaleza, su desarrollo se debe a proyectos de implantación de vertederos.

1.4.2 Modificaciones a la metodología Crisp

Teniendo como antecedentes las investigaciones desarrolladas en esta línea y los aspectos planteados en el apartado anterior, además de nuestra necesidad de contar con una metodología que permita realizar evaluaciones parciales del proyecto, es decir, evaluaciones en una determinada área del proyecto o en un período de tiempo dado, partiendo de la forma de desarrollar las evaluaciones los expertos de nuestro caso de estudio, se ha realizado una modificación a la metodología crisp expuesta, encaminada fundamentalmente a proyectos de minería a cielo abierto.

Se ha desarrollado la Metodología Jerárquica-Matricial Difusa de Evaluación de

Impacto Ambiental, que tiene como base la metodología propuesta. Esta le brinda a los expertos medioambientales la posibilidad de conocer la relevancia del impacto sobre la calidad del medio, importancia del impacto y la valoración de la alteración potencial a ser provocada, magnitud del impacto. Nuestra metodología a partir de estos valores obtiene el valor de un concepto no contemplado anteriormente y que hemos denominado Efecto Ambiental que mide el efecto que provocan las acciones del proyecto sobre cada uno de los factores del medio, así como el Efecto Ambiental Global que provoca el proyecto.

La propuesta consiste, entonces, en modificar la metodología crisp en varios sentidos, principalmente:

- Representar las variables involucradas como variables lingüísticas.
- Permitir que los valores asignados a cada variable sean lingüísticos (conceptos vagos) o numéricos (incluyendo imprecisiones); es decir, permitir que los valores asignados a cada variable sean números difusos.
- Determinar a partir de los valores de Importancia y Magnitud de los impactos ambientales el Efecto Ambiental.
- Realizar las evaluaciones parciales del proyecto, ya sea en cuanto al área que este ocupa o en intervalos de tiempo predeterminados.

De forma general, se propone desarrollar una Metodología Jerárquica-Matricial Difusa de Evaluación de Impactos Ambiental la cual lleva implícito mecanismos que le permiten manipular información con vaguedad, así como que permite segmentar la evaluación de impacto ambiental temporalmente, espacialmente o de ambas maneras simultáneamente, ya que de esta forma puede ajustarse el proyecto global desde el punto de vista de las interacciones entre sus secciones espacio/temporales. Las evaluaciones temporales incluidas en la metodología posibilitan comparar evaluaciones realizadas en periodos de tiempo diferentes, destacando aspectos relevantes a tener en cuenta en la aplicación de las Medidas Correctoras.

La metodología propuesta posibilita realizar diseños de proyectos que serán puestos en marcha. Con el propósito de que los expertos conozcan a priori que

características deben tener su proyecto, y en que medida pueden ser cambiados los valores de las variables ambientales, según criterio inicial del experto. Esta nueva Metodología Jerárquico-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental se presenta en el Capítulo 3.

CAPITULO 2. HERRAMIENTAS.

Introducción

Una vez conocidos los argumentos por los cuales se hace necesario realizar el proceso de evaluación de impacto ambiental para todo proyecto que se ponga en marcha, nos centraremos en la minería como actividad impactante del medio ambiente. En el capítulo anterior vimos como la evaluación de impacto se desarrolla utilizando metodologías que permiten conocer a priori que impacto tendrá el proyecto sobre el entorno. Una forma de contribuir al mejoramiento de estas metodologías ha sido el propósito de esta investigación, en el sentido de que hemos introducido aspectos de inteligencia al proceso, apoyándonos en herramientas matemáticas como la teoría de conjuntos difusos, la teoría de decisión multicriterio y las técnicas de consultas a expertos.

En este capítulo presentaremos las herramientas que nos sirvieron de base en la investigación. Primeramente comentaremos de forma general los Métodos Matemáticos de Ayuda a la Toma de Decisiones, haciendo énfasis en el utilizado, AHP, el cual, en su modificación difusa, fue empleado en la Metodología Jerárquico Matricial Difusa, para una vez obtenidas las combinaciones de los valores de las variables ambientales que intervienen en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, seleccionar cuales de estas alternativas son las mejores, teniendo en cuenta los criterios planteados por los expertos. Hacemos una descripción de este método, así como de su versión difusa.

Para la obtención del conocimiento que forma parte de la base de conocimiento que se implementó para el Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos mineros, fue necesario realizar encuestas a un grupo de expertos, por lo que aplicamos técnicas para obtener el consenso en la información obtenida, para esto hicimos uso del Método de Selección por Rangos, que describimos más adelante, además de otras técnicas que también son empleadas con estos mismos fines.

En segundo lugar se realiza una descripción de la minería, sus actividades, así como los impactos que ocasiona. Para dar un sentido práctico al trabajo se escogió el

yacimiento minero de Punta Gorda en Moa, Cuba, como caso de estudio.

2.1 Herramientas matemáticas.

Utilizar modelos matemáticos para apoyar el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental permite modelar determinados aspectos de este. El uso de la Teoría de Conjuntos Difusos nos permite manipular de forma indistinta información cuantitativa y cualitativa, esta última muy presente en las investigaciones ambientales.

El constante intercambio con los especialistas en cuestiones ambientales, y las problemáticas que esto trae consigo, nos condujo a que fuesen utilizadas técnicas que ayudan a la consulta de expertos, así como también las que nos permiten interpretar y llegar a conclusiones a partir de los resultados de las encuestas que se realizan.

Por la especificidad del proyecto tomado como caso de estudio, desarrollar una metodología para la EIA y obtener soluciones viables, conllevó a la utilización de herramientas que nos permitieran seleccionar la mejor alternativa o un orden de alternativas en nivel de importancia, entre un conjunto de varias posibles, de forma tal que cumplieran con los requerimientos de los evaluadores ambientales. En el subepigrafe posterior trataremos aspectos relacionados con estas técnicas.

2.1.1 Técnicas de Decisión Multicriterio

Se entiende por Técnicas de Decisión Multicriterio el conjunto de herramientas y procedimientos utilizados en la resolución de problemas de decisión, en los que intervienen diferentes criterios, generalmente en conflicto.

En esencia, la Decisión Multicriterio es una optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un único agente decisor. Puede formularse matemáticamente de la siguiente manera [45]:

$$\max F(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \mathbf{X}$$

donde: \mathbf{x} Es el vector $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ de las variables de decisión. El problema de decisión es el de asignar los “mejores”.

X Es la denominada región factible del problema (el conjunto de posibles valores que pueden tomar las variables).

F(x) Es el vector $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]$ de las p funciones objetivo que recogen los criterios u objetivos simultáneos del problema.

En este tipo de problemas encontrar una solución que sea la mejor desde todos los puntos de vista es prácticamente imposible, a esta solución se le denomina comúnmente “solución ideal”. Cuando hablamos de encontrar la mejor solución no nos referimos a la solución ideal, sino una solución que aunque no sea la mejor desde cada punto de vista, si lo sea desde todos ellos en conjunto, a la que se le denomina solución de compromiso.

Un problema de decisión multicriterio puede subdividirse en dos problemas bien diferenciados:

- La identificación y definición del conjunto de posibles soluciones a un problema dado.
- La selección dentro de este conjunto de soluciones, de la solución o soluciones mejores al problema de decisión multicriterio considerado.

Los métodos se pueden clasificar en métodos multicriterios continuos, y métodos multicriterios discretos, dependiendo de la cardinalidad del conjunto de posibles soluciones que generan sea de naturaleza infinita o no.

Clasificación de técnicas multicriterio.

Fijándose en el flujo de información existente entre dos de los actores más destacados del proceso de toma de decisiones, el analista y el decisor, las técnicas multicriterio pueden clasificarse en [45]:

1. Técnicas sin información a priori (generadoras): Son aquellas en las que el flujo de información va desde el analista al decisor. Entre estas técnicas destacan: el método de ponderaciones, el de la ε -restricción y el simple multicriterio.

2. Técnicas con información a priori: El flujo de información es en el sentido contrario, del decisor al analista.

3. Dentro de este grupo de técnicas se suele hacer otra distinción, según el número de alternativas que tenga el problema: finito o infinito. Si el conjunto de alternativas es infinito se suelen aplicar aproximaciones basadas en optimización, en las que se supone que los distintos objetivos pueden ser expresados en un denominador común mediante intercambios. Destacan en este apartado los métodos de Programación por Compromiso Programación por Metas. Si el conjunto de alternativas es discreto, hacemos la siguiente diferenciación:

- a. Métodos de Agregación: En este tipo de Métodos se modelan las preferencias a través de una función valor:
 - i. Directos: Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT).
 - ii. Jerárquicos: Proceso Analítico Jerárquico (AHP).
- b. Métodos basados en relaciones de orden: Se modelan las preferencias a través de un sistema de relaciones binarias:
 - i. Métodos de Superación (MS)

4. Técnicas en las que el flujo de información es en los dos sentidos, dando lugar a las denominadas técnicas interactivas. Dentro de este conjunto de métodos, los más utilizados han sido: STEM y Método de Ziots-Wallenius. En la actualidad, casi todos los métodos pueden considerarse dentro de este último grupo, bastando para ello que el decisor revise sus juicios dentro del proceso de toma de decisiones.

Respecto de los tres métodos discretos mencionados anteriormente, se puede indicar que, a pesar de los duros enfrentamientos que han tenido los respectivos seguidores, recientemente se está buscando la integración de las mismas, o por lo menos, la integración de las dos técnicas consideradas de la escuela americana (MAUT y AHP).

Aquellos problemas en los que el conjunto de alternativas es finito, además de discreto y, cuya decisión se basará en las diversas características o atributos de las alternativas respecto de los criterios de decisión relevantes, se llaman Decisión Multicriterio Discreta y les son aplicables algunos de los métodos de la Decisión

Multiobjetivo. No obstante existen para ellos métodos específicos como el AHP, entre muchos otros.

Métodos de Decisión Multicriterio

Los métodos multicriterio brindan herramientas para solucionar un determinado problema en el cual coexisten varios puntos de vistas que pueden ser contradictorios (distintos criterios de elección) que han de tomarse en consideración para obtener la mejor solución.

Fases en la toma de decisiones

En el proceso de toma de decisiones se pueden identificar de forma general 4 fases [45]:

- **Recogida de información:** Obtención de datos con respecto a los criterios y alternativas.
- **Diseño:** Determinación precisa de los criterios, su escala de medida, y obtención del conjunto de alternativas.
- **Selección:** Elección de una alternativa utilizando para ello un determinado método.
- **Revisión:** Procedimiento que realiza un estudio formal de las decisiones tomadas en la solución del problema, aunque rara vez es realizado.

Estas fases no se desarrollan en un orden inmutable, sino que es susceptible pasar de unas a otras a lo largo del proceso de toma de decisión.

Agentes participantes en el proceso de toma de decisión.

En el proceso de toma de decisión multicriterio participan tres agentes principales bien diferenciados: el modelo, el analista y el decisor.



Figura 2.1: Interrelación de las Entidades que intervienen en el proceso de toma de decisiones

El modelo está formado por toda la información que está a disposición del analista para la obtención de la mejor solución, es decir, el modelo es la representación del problema, que puede contener por ejemplo: el modelo multicriterio elegido, información sobre las preferencias del decisor, restricciones sobre las soluciones, etc.

El analista es el encargado de modelar la situación en estudio (problema de decisión) y de recoger y expresar de forma adecuada dentro del modelo, las preferencias del decisor, así como tratar éstas de la manera más objetiva posible, sin que influyan en el análisis sus preferencias personales sobre dicho modelo.

El analista eventualmente puede hacer recomendaciones relativas a la selección de la solución final, juega el papel de un mensajero entre el modelo y el decisor. Debido al avance del software y el hardware es usual sustituir al analista por un programa de ordenador, debido a que este ofrece al decisor una mayor interacción y control del modelo.

Paradigma de decisión

Los procesos de toma de decisiones están basados en paradigmas que pueden ser resumidos en los siguientes pasos [45]:

- I. Definición o establecimiento del conjunto de soluciones posibles o factibles del problema.
- II. Para cada criterio (punto de vista), asociado a cada solución (alternativa), da un valor numérico que representa el grado de deseabilidad que tiene cada alternativa para el decisor.
- III. Utilización de técnicas más o menos sofisticadas para proceder a buscar entre las soluciones factibles, aquella que posea mayor grado de deseabilidad, dicha alternativa será la solución óptima.

La contradicción en el proceso de decisión multicriterio viene dada porque algunos criterios se desean minimizar y otros maximizar. Cuando el deseo del decisor es maximizar o minimizar un determinado criterio, a este se le denomina objetivo.

Un ejemplo de objetivo puede ser minimizar el costo en la ejecución de un determinado proyecto, otro puede ser maximizar el beneficio; estos dos criterios son contradictorios, pues a mayor beneficio mayor costo de producción, por lo tanto si se maximiza el beneficio no se puede minimizar a la vez el costo, así habrá que elegir un punto donde el beneficio obtenido junto con el costo de producción sean adecuados a las preferencias del decisor.

Tipos de problemas multicriterios

Un problema de decisión multicriterio es una situación de la vida real, en la que dado un conjunto de alternativas A y una familia de criterios C el decisor puede desear resolver los siguientes subproblemas [5]:

- **Problema de selección (Problemática α):** El objetivo es ayudar a la toma de decisiones mediante la selección de un subconjunto lo más restringido posible, teniendo en cuenta que la selección final se centra en unas pocas alternativas. Este subconjunto tendrá las “mejores” alternativas o las alternativas “satisfactorias”. El resultado es una selección o un procedimiento de selección.
- **Problema de clasificación (Problemática β):** Pretende resolver el problema de decisión multicriterio mediante una clasificación, producida por el hecho de asignar cada alternativa a una categoría (o clase). Las diferentes categorías se definen a partir de normas aplicables al conjunto de las alternativas. El resultado es una clasificación o procedimiento de asignación de las alternativas.
- **Problema de ordenación (Problemática γ):** Trata de buscar ayuda a la toma de decisiones mediante una ordenación obtenida de agrupar todas o partes (las mas satisfactorias) de las alternativas en clases de equivalencia, ordenando estas clases de modo completo o parcial

conforme a las preferencias del decisor. El resultado es una ordenación de las alternativas.

- **Problema de descripción (Problemática δ):** Se plantea la solución del problema de toma de decisiones mediante una descripción, con un lenguaje apropiado, de las alternativas y de sus consecuencias. El resultado es una descripción o un conocimiento cognitivo de las posibles relaciones causales entre los elementos.
- **Problema de solución con restricciones (Problemática ϵ):** Se propone ayudar a la decisión sobre varias alternativas que deben ser tomadas en un contexto de restricciones de tipo técnico, político-administrativo, financiero o de disponibilidad de recursos en general. El resultado es la selección de un subconjunto de acciones que cumple con las restricciones impuestas y representa una solución “mejor” o “satisfactoria” en términos de alguna función de utilidad o de valor del decisor.

Los problemas de la vida real son, fundamentalmente, una mezcla de problemas de selección, ordenación, clasificación y descripción.

Además atendiendo solo al número de criterios que pueden aparecer en un problema de decisión multicriterio, estos se pueden clasificar en dos tipos diferentes:

- **Problemas económicos:** Son los problemas en los que subyace la existencia de múltiples criterios. Es un problema de decisión que se observa en la vida real y por lo tanto puede ser un problema de tipo elección, ordenación, clasificación, o alguna combinación de estos tipos de problemas multicriterio.
- **Problemas tecnológicos:** Solo existe en el problema un único criterio. No es un problema de decisión real sino una simple búsqueda de la mejor solución entre todas las posibles.

Entre los métodos discretos está el Método de las Jerarquías Analíticas (AHP), que describimos en esta memoria porque ha sido el utilizado para nuestro problema de toma de decisiones. La característica fundamental que distingue a los métodos discretos

es que son métodos de sobrecalificación

Métodos de sobrecalificación

El concepto de sobrecalificación también denominado de superación, fue concebido por un grupo de investigadores franceses a mediados de los años 60.

Los métodos de sobrecalificación son menos sólidos teóricamente pero más fáciles de aplicar a problemas reales. Tienen un número reducido de alternativas o elecciones posibles que deben ser evaluadas en base a varios atributos o criterios.

La sobrecalificación se establece en base a dos conceptos: concordancia y discordancia

La concordancia cuantifica hasta que punto para un elevado número de atributos la alternativa A es más preferida que la alternativa B.

La discordancia cuantifica hasta que punto no existe ningún atributo para el que B sea mucho mejor que A.

Todos los métodos de sobrecalificación tienen como mecanismos básicos el de comparaciones binarias entre alternativas, y están divididos en dos fases bien diferenciadas:

- I. **Fase de construcción** de la relación de sobrecalificación, para poder comparar las distintas alternativas.
- II. **Fase de explotación** de esta relación de sobrecalificación, donde se comparan las distintas alternativas y, dependiendo del método, se obtienen las mejores alternativas o se ordenan estas.

Relación de sobrecalificación

La relación de sobrecalificación, se construye a partir de lo que se conoce como la matriz de concordancia (c), y la matriz de discordancia (d). La matriz de concordancia, de dimensiones $m \times m$ se calcula de la siguiente forma:

A cada criterio se le asigna un peso w_j , que indica la importancia subjetiva de cada criterio del decisor.

Para cada par de acciones (A_i, A_k) se le asocia el siguiente índice de concordancia:

$$C(A_i, A_k) = c_{i,k} = \frac{1}{W} \sum_{j: g_j(A_i) \geq g_j(A_k)} w_j, \quad \text{donde} \quad W = \sum_{j=1}^n w_j$$

Este índice $c_{i,k}$ toma valores en el intervalo $[0,1]$. El valor índice de concordancia es considerado como una medida de verdad, es la afirmación “la alternativa A_i supera a la alternativa A_k ”. El índice de discordancia es por el contrario, el conjunto de criterios que pueden llegar a poner en duda la afirmación anterior, es decir, el conjunto de criterios para los cuales la información “la alternativa A_k supera a la alternativa A_i ” es cierta.

Estas matrices reflejan el concepto de sobreclasificación, es decir, la matriz de concordancia cuantifica la cantidad de criterios para los cuales se pueden decir que una alternativa A_i es mejor que A_k , y la matriz de discordancia cuantifica las razones para decir lo contrario, aunque sea en al menos un criterio, es decir, si existe al menos un criterio para la cual la alternativa A_k sea sobradamente mejor que la alternativa A_i , lo que indica cuanto es inferior una alternativa A_i con respecto a otra alternativa A_k .

Métodos de Decisión Multicriterios Difusos

Los problemas de decisión en general, son procesos de búsqueda de la mejor opción de entre un conjunto de posibles alternativas dadas como solución factible a un determinado problema. Este tipo de problemas tan comunes en la vida real pueden tener distintas repercusiones sociales según su importancia.

Para las decisiones de gran repercusión social como lo suele ser la Evaluación de Impacto Ambiental, que es el problema que nos ocupa, se han desarrollado modificaciones del método de toma de decisión comentado en el apartado anterior. Basados en qué en el proceso de toma de decisiones intervienen también conceptos

vagos e imprecisos, y además a que los valores crisp asociados al problema de decisión son totalmente inadecuados para resolver determinados problemas reales.

Un enfoque mucho más realista puede ser usar estimadores lingüísticos en lugar de valores numéricos, es decir, utilizar variables lingüísticas para los pesos y criterios en el procedimiento del método.

Varios autores han realizado investigaciones en este sentido, expondremos la desarrollada por James J. Buckley de la Universidad de Alabama, Estados Unidos.

Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

El proceso analítico jerárquico (AHP), es una metodología de análisis multicriterio desarrollada a fines de la década del 70 por el doctor en matemáticas Thomas L. Saaty [47]. Con el tiempo se transformó en una de las metodologías multicriterio de mayor aplicación práctica.

El AHP involucra todos los aspectos del proceso de toma de decisiones: Modela el problema a través de una estructura jerárquica, utiliza una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, de este modo combina la multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetiza los juicios emitidos y entrega un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos (prioridades).

Esta metodología propone una manera de ordenar el pensamiento analítico, de la cual destacan tres principios básicos:

- El principio de la construcción de jerarquías
- El principio del establecimiento de prioridades
- El principio de la consistencia lógica

Las jerarquías que trata el método de AHP son aquellas que conducen un sistema hacia un objetivo deseado como la solución de conflictos, un desempeño eficiente o la solución esperada.

Cada conjunto de elementos en una jerarquía como la antes mencionada ocupa un nivel de la jerarquía. El nivel superior llamado Foco, consta solamente de un elemento: el objetivo amplio y global. Los niveles siguientes pueden tener cada uno diversos elementos. Debido a que los elementos de un nivel deberán compararse uno con el otro en función de un criterio del nivel superior siguiente, los elementos de cada nivel deben ser del mismo orden de magnitud.

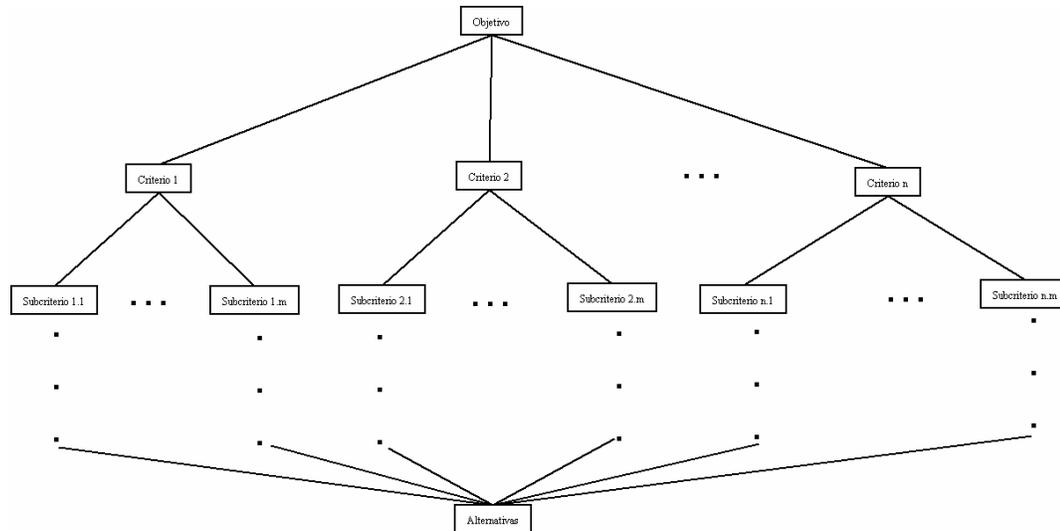


Figura 2.2: Estructura jerárquica del método AHP.

El segundo principio que destaca de este método multicriterio es el establecimiento de prioridades entre los elementos de la jerarquía. Se propone una escala de prioridades como forma de independizarse de las diferentes escalas que existen entre sus componentes. Los seres humanos perciben relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares entre ellos con respecto a un cierto criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro. La síntesis del conjunto de estos juicios arroja la escala de intensidades de preferencias (prioridad) entre el total de elementos comparados. De esta forma es posible integrar el pensamiento lógico con los sentimientos, la intuición, (que es reflejo de la experiencia) los juicios que son ingresados en las comparaciones a pares responden a estos factores.

De acuerdo a lo anterior, el primer paso para establecer las prioridades es

realizar comparaciones a pares entre elementos de un mismo nivel con respecto al elemento de nivel superior de que dependen. Las matrices de comparación resultan ser la forma más conveniente para esta etapa del proceso, en cada elemento de la matriz se ingresa el valor de la preferencia del elemento, por sobre el elemento. De acuerdo con el procedimiento matemático propuesto por la metodología, una vez completadas las matrices de comparación la obtención de las prioridades se transforma en un problema de vectores y valores propios, donde el vector propio asociado al mayor valor propio de cada matriz de comparaciones representa el ranking u orden de prioridades mientras que el mayor valor propio es una medida de la consistencia del juicio.

El tercer principio del pensamiento analítico es la consistencia lógica. Los seres humanos tienen la capacidad de establecer relaciones entre los objetos o las ideas, de manera que sean consistentes, es decir, que se relacionen bien entre sí y sus relaciones muestren congruencia. En este sentido consistencia implica dos cosas: transitividad y proporcionalidad; la primera es que deben respetarse las relaciones de orden entre los elementos, es decir, si A es mayor que C y C es mayor que B entonces la lógica dice que A es mayor que B. La segunda es que las proporciones entre los órdenes de magnitud de estas preferencias también deben cumplirse con un rango de error permitido. Por ejemplo si A es 3 veces mayor que C y C es dos veces mayor que B entonces A debe ser 6 veces mayor que B, este sería un juicio 100% consistente (se cumple la relación de transitividad y de proporcionalidad).

La escala a que se hace referencia existe en el inconsciente, no está explícita y sus valores no son números exactos, lo que existe en el cerebro es un ordenamiento jerárquico para los elementos. Dada la ausencia de valores exactos para esta escala la mente humana no está preparada para emitir juicios 100% consistentes (que cumplan las relaciones de transitividad y proporcionalidad). Se espera que se viole la proporcionalidad de manera tal que no signifique violaciones a la transitividad.

Valor	Definición	Comentario
1	Igual importancia	A y B tienen la misma importancia
3	Importancia moderada	A es ligeramente más importante que B
5	Importancia grande	A es más importante que B
7	Importancia muy grande	A es mucho más importante que B
9	Importancia extrema	A es extremadamente más importante que B

Tabla 2.1: Criterios de comparaciones de los expertos en el método AHP

En la Tabla 2.1 se definen y explican los elementos que forman la escala recomendada para las comparaciones a pares entre los elementos de los niveles de la jerarquía, los valores en ella contenidos representan una escala absoluta, con los que se puede operar perfectamente. En todo caso cabe señalar que el método es independiente de la escala utilizada.

De esta manera el Análisis Jerárquico de Procesos integra aspectos cualitativos y cuantitativos en un proceso único de decisión, en el que es posible incorporar simultáneamente valores personales y pensamiento lógico en una estructura única de análisis a modo de convertir el proceso que ocurre naturalmente en nuestra mente en un proceso explícito, facilitando y promoviendo la toma de decisiones bajo escenarios multicriterios, promoviendo resultados más objetivos y confiables.

Un supuesto importante implícito en este modelo es que es necesario partir de la base que no existe la decisión "correcta e inmutable" (como si se tratara de un sistema de ecuaciones donde se deba despejar y encontrar el valor exacto de x), esto queda determinado por las percepciones de quienes participan en el proceso, de esta manera las decisiones son subjetivas y dependen de los valores y objetivos personales, del momento, etc. Hay que recordar que los juicios considerados en la evaluación están sujetos a las condiciones impuestas por el escenario existente al momento de realizar el análisis, las decisiones propuestas por el modelo son válidas para esa realidad, en ese instante de tiempo. Para otras circunstancias (otro escenario) es probable que la importancia relativa de los criterios sea diferente.

Procedimiento

1.- Definición del problema: En esta etapa debe quedar claramente definido el objetivo general del proceso de decisión junto con los actores involucrados en él. Además se debe entregar una descripción del ambiente en que se desarrollará el estudio, sus características socio-económicas, ambientales, culturales, etc. dependiendo de los parámetros afectados por los proyectos en cuestión.

2.- Definición de actores: Los participantes involucrados en el proceso de decisión, deben ser cuidadosamente seleccionados, ya que de estos depende la representatividad del resultado del modelo.

3.-Estructurar el problema de decisión en un modelo de jerarquía (Jerarquizar): En esta etapa se debe construir una estructura jerárquica que involucre todos los aspectos de interés, para la jerarquización de las alternativas.

4.- Selección de las alternativas factibles: Dentro de todas las posibilidades de proyectos alternativos se seleccionan aquellos que son factibles de realizar bajo un punto de vista de análisis general, donde se consideran criterios tales como la factibilidad técnica o económica.

5.-Construcción del modelo jerárquico: Se estructura el problema planteado en una jerarquía de criterios y alternativas. Para esto es necesario definir en una primera instancia los criterios estratégicos que participan en la decisión (Políticos, económicos, sociales, medioambientales, etc.). Por lo general estos criterios son a nivel macro y representan los objetivos perseguidos por el proyecto. Una vez hecho esto, se procede a desglosar cada uno de los criterios definidos en la etapa anterior hasta llegar a un nivel de especificación que permita un fácil análisis y la comparación de las alternativas.

6.- Ingreso de los juicios: En base a la información obtenida o a la percepción de los actores del proceso se ingresan los juicios para cada par de elementos. Se comienza del primer nivel, dónde se encuentran los criterios estratégicos, se compara su importancia relativa con respecto del logro del objetivo general, luego se desciende en los niveles jerárquicos, siempre realizando comparaciones de a pares referidos al nivel

inmediatamente superior, hasta llegar al último nivel donde se encuentran las alternativas, las que son evaluadas en base a criterios técnicos más fáciles de tratar.

7.- Síntesis de los resultados: Como se explicó en los párrafos anteriores, por medio de comparaciones entre pares de elementos con respecto a su nivel inmediatamente superior y, gracias a la propiedad de transitividad entre los elementos, es posible establecer un ranking de prioridades para las diferentes alternativas, ranking que, dependiendo de la problemática, enfrentada representa la decisión a adoptar.

8.- Validación de la decisión: Para otorgar mayor confiabilidad a la decisión se debe establecer el rango de variación del peso relativo de los criterios estratégicos que soporta la decisión sin cambiar de alternativa propuesta, para esto se realiza un análisis de sensibilidad dónde se analizan diversos escenarios posibles, determinando los puntos de corte para el peso de cada uno de los criterios.

Cabe destacar que todo este proceso debe estar muy bien documentado, cada una de las etapas debe contar con la información suficiente para su desarrollo y justificación.

Proceso Analítico Jerárquico Difuso (AHP Difuso)

En el Análisis Jerárquico, como vimos anteriormente, se solicita a un experto su criterio a_{ij} , por cada par de comparaciones entre alternativas A_1, \dots, A_m , por cada criterio en la jerarquía (objetivo), y entre criterios. Para un criterio específico C_k , si un experto considera a A_1 más importante que A_5 , entonces a_{15} debe ser igual a 3/1, 5/1 o 7/1. Los números de los pesos deben ser tomados del conjunto $S = \{ 1, 2, \dots, 9 \}$ tal que a_{15} puede ser s_1/s_5 con $s_1, s_5 \in S$ y $s_1 > s_5$. Los pesos a_{ij} indican, para este experto, la fuerza con la que A_i domina a A_j . Si $a_{15} = 5/1$ entonces $a_{51} = 1/5$. Esto es, $a_{ij} = (a_{ji})$ para todo i, j , con $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

En el método tradicional AHP, los criterios de los expertos son tomados como exactos (o crisp, siguiendo la terminología de la lógica difusa). Sin embargo, en muchos casos prácticos, el modelo seguido por los humanos, para realizar el proceso de decisión

podría verse afectado por la ineficiencia de los expertos para asignar valores numéricos exactos a los juicios de comparación. Por ejemplo, cuando deseamos realizar una evaluación de las diferentes alternativas para lograr un efecto de impacto ambiental global determinado, los expertos encargados de la evaluación se encuentran generalmente inseguros en su nivel de preferencia entre las combinaciones de los valores de las variables que intervienen en el proceso de EIA, ya que muchos de los criterios de evaluación en el ámbito medioambiental son subjetivos y cualitativos, es difícil para el experto expresar su preferencia por parejas de juicios asignando un único valor numérico.

Juicios de comparación difusos

Basados en la comparación por pares, se necesita aplicar un método de asignación de prioridades. El método empleado por el AHP estándar, eigenvalue, no puede usarse cuando el experto se enfrenta a un problema complejo e incierto y emite sus juicios de comparación en proporciones inciertas como “aproximadamente dos veces más importantes”, “entre dos y cuatro veces menos importante”, etc.

Una forma de enfrentarse con tales juicios inciertos es expresar las proporciones de comparación como números o conjuntos difusos que incorporan la imprecisión propia de la expresión en los juicios de los expertos. El juicio emitido por los expertos puede ser representado por el número difuso \tilde{a}_{ij} [8].

Para nuestra representación utilizaremos números difusos triangulares. Un número difuso triangular está definido por 3 números reales $a \leq b \leq c$ y se caracteriza por una función de pertenencia.

$$\tilde{N}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & o.c \end{cases}$$

El numero difuso \tilde{N} es expresado como un triple (a,b,c) , donde a y c serán la cota inferior y superior respectivamente. Esta será la notación que se empleará mas adelante.

Derivación de prioridades desde la matriz de comparación difusa

Considerando un problema para establecer prioridades de n elementos, donde los juicios de comparación por pares son representados por números difusos triangulares $\tilde{a}_{ij}=(l_{ij}, m_{ij}, n_{ij})$, como en la versión estándar de AHP, la matriz de comparaciones difusa se construye quedando de esta forma:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde $\tilde{a}_{ij} = 1/\tilde{a}_{ji}$.

De los métodos para establecer prioridades difusas se derivan las prioridades difusas \tilde{w}_i , $i= 1, 2, \dots, n$, desde (2), se hace una aproximación difusa a las proporciones \tilde{a}_{ij} tal que $\tilde{a}_{ij} \approx w_i/w_j$.

Todos los pesos derivados por estos métodos son números o conjuntos difusos por lo que el proceso de agregación en el último paso del AHP da lugar a un conjunto de alternativas que también son representadas como conjuntos difusos.

Una explicación ampliada aparece en [8].

En la versión difusa del AHP es necesario encontrar un vector de prioridad crisp $w=(w_1,w_2,\dots,w_n)^T$ tal que las proporciones de prioridad w_i/w_j se aproximen a los juicios iniciales emitidos por los expertos, lo que sería:

$$l_{ij} \lesssim \frac{w_i}{w_j} \lesssim u_{ij},$$

donde el símbolo $\tilde{\leq}$ denota menor o igual a para entidades difusas.

Se introduce la función de pertenencia que representa la satisfacción de los expertos en la decisión con diferentes proporciones de soluciones crisp. Cada prioridad crisp en el vector w satisface la desigualdad planteada anteriormente.

$$\mu_{ij}\left(\frac{w_i}{w_j}\right) = \begin{cases} \frac{\frac{w_i}{w_j} - l_{ij}}{m_{ij} - l_{ij}}, & \frac{w_i}{w_j} \leq m_{ij} \\ \frac{u_{ij} - \frac{w_i}{w_j}}{u_{ij} - m_{ij}}, & \frac{w_i}{w_j} \geq m_{ij} \end{cases}$$

El procedimiento que propone el método esta basado en la reglas de decisión maximin de la teoría de juegos. La regla maximin es aplicada por Bellman y Zadeh para resolver problemas con ambientes difusos.

El problema maximin puede ser transformado a un problema de programación lineal, se representa de la siguiente forma:

Maximizar λ

Sujeto a

$$\lambda \leq \mu_{ij}(w), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad j = 2, 3, \dots, n, \quad j > i$$

$$\sum_{l=1}^n w_l, \quad w_l > 0, \quad l = 1, 2, \dots, n.$$

Finalmente para el problema de la versión difusa del AHP tendríamos:

Maximizar λ

Sujeto a

$$(m_{ij} - l_{ij})\lambda w_j - w_i + l_{ij}w_j \leq 0,$$

$$(u_{ij} - m_{ij})\lambda w_j + w_i - u_{ij}w_j \leq 0,$$

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1, \quad w_k > 0, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1, \quad j = 2, 3, \dots, n, \quad j > i$$

La solución óptima para el problema no lineal (λ^*, w^*) se obtiene utilizando algún método numérico apropiado.

El valor óptimo λ^* si es positivo indica que todas las proporciones satisfacen los juicios de los expertos, $l_{ij} \leq \frac{w_i^*}{w_j^*} \leq u_{ij}$, lo cual significa que los juicios iniciales de los expertos son consistentes. Un valor negativo de λ^* muestra que las proporciones de las soluciones son aproximadamente satisfechas, y los juicios de los expertos son claramente inconsistentes.

El valor óptimo de λ^* puede ser usado como medida de consistencia para el conjunto difuso inicial de juicio de los expertos.

En el próximo capítulo se muestra un ejemplo de la aplicación de esta versión del método AHP para la selección de la mejor alternativa en el diseño de proyectos ambientales.

Técnicas de consulta a grupos de expertos

En la búsqueda para eliminar subjetividad en procesos evaluativos que dependen de la asignación de pesos a factores; o establecimiento de órdenes jerárquicos o de importancia para estos; o para determinados objetivos, entre otros, han sido desarrolladas diversas técnicas que acudiendo a consultas hechas a grupos de expertos, permiten mediante consenso, tomar posición al respecto [13].

Estas técnicas, conocidas también con la denominación "de convergencia", han sido ampliamente empleadas en las ciencias sociales. Se destaca la consulta tipo Delphi, la cual se fundamenta en la consulta sistematizada que de forma anónima, se realiza sobre un grupo de expertos en la materia [29].

Para este fin, es elaborado un cuestionario con las preguntas sobre las cuales se adoptará la decisión de convergencia. Dicho cuestionario es enviado a cada uno de los miembros del grupo de expertos (panel), quienes de forma anónima proceden a su resolución y reenvío al director de la encuesta.

Del primer ciclo de consulta se hace una lectura y síntesis por parte del director de la encuesta, quien la envía nuevamente a cada uno de los expertos, con el fin de que, a su vista, elaboren una nueva respuesta. Este ciclo se repite en busca de la convergencia, hasta que se estime que la reiteración no contribuye significativamente en su mejoría.

Descripción de las técnicas

El método más sencillo es el de ordenación por rangos simples, al cual sigue en complejidad el de comparación por pares y, finalmente, el de clasificación por rangos escalares. Este grupo reúne las técnicas de mayor uso en las consultas a expertos, razón por la cual ha sido escogido para su descripción a continuación.

Método de ordenación por rangos

Es el método más simple dentro de los disponibles. Consiste en la ordenación jerárquica de un conjunto de n elementos. Para esto, se solicita al grupo de expertos que ordenen dicho conjunto, de tal forma que el primer lugar o máxima jerarquía, reciba un valor correspondiente a $n - 1$; el segundo lugar $n - 2$, y así sucesivamente, hasta evaluar el último elemento del conjunto en cuestión, para el cual el valor correspondiente deberá ser cero.

Los cálculos vienen dados en primera instancia por la suma de puntos asignados por cada juez a cada uno de los criterios, valor que dividido por la sumatoria total de puntos, representará el peso correspondiente a cada elemento y criterio decisorio final.

Método de comparación por pares

Este método, sin acudir a la técnica valorativa sino mejor al posicionamiento, permite detectar la importancia que tienen los diferentes factores evaluados. Para este propósito, el conjunto de factores es presentado al grupo de expertos por parejas, de las cuales deben seleccionar el factor que estos consideren de mayor importancia en cada sorteo. El número de sorteos se corresponde con el número de posibles parejas, permitiéndose la transitividad, o lo que es lo mismo, el número de juicios hechos por cada experto será $n(n - 1)/2$, siendo n el número de factores.

Luego se calculará y analizará la frecuencia de elección de cada factor, valor que, dividido entre el total de número de juicios, arrojará el valor ponderal de cada factor. Finalmente, la suma de los valores ponderados de todos los expertos por factor, dividida entre el número de expertos, permitirá obtener el peso correspondiente a cada uno de ellos.

Método de clasificación por rangos escalares

Este método de clasificación acude al grupo de expertos, ya no estableciendo un orden de jerarquía mediante posición, sino mediante valoración, según arreglo a una escala preestablecida. La escala en cuestión suele variar entre 1 y 10, correspondiendo el valor 1 a la condición menos importante o más desfavorable, y el valor 10 a la situación contraria.

Los valores de cada factor son relativos según el juez, es decir, cada factor es dividido por el total de puntos asignados al total de factores por cada juez, siendo obtenido el criterio final decisorio mediante el cálculo de la suma de los valores recién obtenidos para cada factor, dividida entre el número de jueces que participen en la encuesta.

2.2 Actividad Minera. Impactos que ocasiona. Normativas Cubanas.

La actividad minera, es uno de los proyectos que provoca mayor impacto ambiental. Cada una de sus etapas genera impactos ambientales específicos, por lo que los proyectos mineros deben ser reglamentados y controlados y estarán sujetos al Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental. Deberán causar la menor alteración posible, sea de manera directa o indirecta, según plantean las leyes cubanas.

Un proyecto de este tipo fue escogido como caso de estudio, por lo que en este epígrafe se hace una descripción de las actividades que se desempeñan, los impactos que ocasiona, y que leyes la rigen.

2.2.1 Características de la actividad minera. Principales impactos que ocasiona.

Una mina es el conjunto de labores necesarias para explotar un yacimiento y, en algunos casos, las plantas necesarias para el tratamiento del mineral extraído. Las minas también reciben el nombre de explotaciones mineras, o, simplemente, explotaciones.

Las minas pueden ser divididas siguiendo varios criterios. El más amplio tiene en cuenta si las labores se desarrollan por encima o por debajo de la superficie, dividiéndolas, respectivamente, en minas a cielo abierto y en minas subterráneas.

Mina a cielo abierto

Las minas a cielo abierto, o minas a tajo abierto, son aquellas cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno, y con maquinarias mineras de gran tamaño. Las labores características de este sistema de explotación son los: bancos, bermas, pista, talud final, talud de trabajo, plaza, corta.

Mina subterránea

La minería subterránea desarrolla su actividad por debajo de la superficie a través de labores subterráneas. En términos comparativos, la maquinaria que se usa en la minería subterránea es mucho más pequeña que la que se utiliza a cielo abierto, debido a las limitaciones que impone el tamaño de las galerías y demás labores. Las

labores características de este sistema de explotación son los: túneles, cavernas, bocamina o emboquille, cuartel, galería, pozo, chimenea...

En el proyecto tomado como caso de estudio, es una mina a cielo abierto.

Los proyectos de minería son diferentes a los del resto de las actividades industriales, ya sea de tipo a cielo abierto o subterránea, en dos aspectos principales:

- La localización de una mina viene predeterminada por la localización del recurso mineral explotable.
- El comienzo de la actividad minera viene precedido por un largo proceso de exploración regional y evaluación local. Este proceso puede tardar entre 10 y 15 años.

Como en este tipo de proyecto no se determina el sitio en el que se realizará la explotación a conveniencia, sino que la decisión de minar o no, depende del sitio donde se encuentre el recurso mineral a explotar, hay que tener en cuenta varios aspectos relacionados con las condiciones que presenta el lugar antes de comenzar la explotación de los recursos minerales de la zona. Realizar comparaciones relacionadas con el aspecto económico, sobre todo si es un sitio que de alguna forma contribuye a generar ingresos económicos, sin tener en cuenta los recursos naturales que posee, sino por otra actividad que en el se desarrolle, estableciendo un nivel de prioridad por parte de las autoridades pertinentes.

Descripción de las actividades fundamentales de la minería.

Los trabajos de preparación minera, están encaminados a crear las condiciones necesarias para que la extracción y el transporte del mineral se realicen con calidad y de forma eficiente, los mismos comprenden una amplia gama de actividades que varían en dependencia de las condiciones concretas de cada yacimiento (Hernández, 2003). Para el caso concreto del yacimiento Punta Gorda las actividades fundamentales de preparación minera son las siguientes en orden cronológico:

Desbroce.

Consiste en la eliminación de la capa vegetal y paralelamente se realiza la conformación del terreno permitiendo la entrada de los equipos de arranque y carga. Se realiza con Topadores Frontales, previa tala de los árboles útiles y el material removido es depositado fuera del área de trabajo y posteriormente a la minería se utilizará como suelo para la rehabilitación de acuerdo al programa de Medio Ambiente de CUBANÍQUEL

Destape.

El destape consiste en el corte y traslado del horizonte superior (escombro) del cuerpo mineral que por su bajo contenido de níquel y cobalto, no resulta económico enviarlo al proceso en la actualidad, el mismo es depositado, por lo general, dentro de las áreas de donde han extraído el mineral útil, de modo tal que sirva de substrato para la rehabilitación y que además pueda ser reprocesado en un futuro por la industria, cuando resulte económicamente factible. Teniendo en cuenta la posible posterior utilización del mineral de baja ley se planificarán depósitos intermedios por lo que el escombreo será realizado de forma selectiva.

Construcción de caminos.

La construcción de caminos es una labor que requiere especial cuidado, desde la proyección hasta la construcción propiamente dicha, pues los mismos deben de cumplir con una serie de requisitos que son indispensables para que el transporte de mineral se realice con seguridad y economía. Se debe tener en cuenta que los caminos mineros son de dos tipos: Principales y secundarios, en dependencia del uso a que estén destinados.

Montaje de líneas eléctricas.

Para llevar la energía hasta los frentes, es necesario el montaje de líneas eléctricas de alta fiabilidad, tanto en el funcionamiento como en la seguridad del trabajo, el trazado de las líneas aéreas hay que realizarlo de forma tal que las pizarras

Herramientas

queden cerca de los frentes de trabajo, pero que no interfieran el movimiento de las excavadoras, ni estén en ningún caso dentro del radio de acción de las mismas.

Drenaje.

Debido a las condiciones hidrogeológicas del yacimiento, es necesario realizar una serie de trabajos de drenaje para reducir la humedad del mineral y para evitar las pérdidas por el fondo.

La efectividad del drenaje depende de factores naturales tales como la transmisibilidad del cuerpo mineral, el relieve, las características de la zona de alimentación y régimen de lluvia, así como la configuración del fondo del mineral.

Extracción y transporte del mineral.

Esta es la actividad más importante que se realiza en una mina, pues garantiza el proceso metalúrgico, los contenidos y volúmenes necesarios para obtener el producto final

Se transportará el mineral hasta depósitos intermedios de homogeneización.

Rehabilitación minera

Esta actividad se realizará de acuerdo al proyecto de rehabilitación minera que existe en la mina, el mismo consta de todas las partes necesarias para la realización eficaz de estos trabajos, se debe tener en cuenta que no deben existir retrasos con el proyecto de explotación ambos deben de ejecutarse en paralelo.

Una vez descrita nuestra problemática, y haciendo énfasis e la necesidad de herramientas que permitan determinar a priori el efecto ambiental causado, pasamos a describir la metodología de evaluación de impacto desarrollada.

2.2.2 Impactos generados por la actividad minera

Cuando se pretende llevar a cabo labores de minería, juega un papel fundamental el estudio que se debe hacer a priori para determinar los daños que puede ocasionar la puesta en marcha de esta actividad, una vez que se halla decidido realizar la explotación, desde el punto de vista medioambiental, sobre todo por ser esta una actividad que provoca numerosos impactos a los diferentes recursos del medio.

Entre los impactos provocados por la minería podemos mencionar algunos:

a) Impacto sobre los recursos hídricos (ecosistemas acuáticos, aguas superficiales, subterráneas y marinas).

Incorporación de materia orgánica, que produce una disminución en la cantidad de oxígeno disuelto y con ello afecta el desarrollo de la vida acuática. Su origen está asociado a la deforestación de áreas tropicales durante la apertura de minas a cielo abierto y tala indiscriminadas de los bosques existentes para crear la infraestructura necesaria.

Incorporación de diferentes nutrientes que pueden llegar a ocasionar eutrofización (exceso de alimento para las plantas en el agua) del agua, generalmente están asociados a los arrastres por erosión de las escombreras de suelo del destape del yacimiento y a los procesos de deforestación. También pueden incorporarse elementos metálicos que constituyen alimentos para el desarrollo de diferentes microorganismos.

b) Variación de la morfología del terreno e Impactos paisajísticos

Las modificaciones morfológicas se traducen en impactos paisajísticos considerables, frecuentemente agravados por la destrucción o degradación de la vegetación y construcciones diversas para la actividad minera. Los impactos paisajísticos pueden aparecer también lejos de las operaciones (por ejemplo, masa de aire contaminado por el polvo de aterramiento)

c) Impacto sobre el aire (atmósfera)

Los contaminantes se originan al dividir, triturar o remover suelos, sedimentos y rocas. Las causas son la incorporación de partículas por la erosión del viento. La composición de ese polvo es variada y depende principalmente del material geológico que se explota, pero el tamaño, el volumen y otras características dependen de las técnicas de minería utilizadas y en menor medida de otros factores fundamentalmente del clima local

d) Impactos sobre los suelos, la flora y la fauna asociada a ellos.

La vegetación puede sufrir los efectos de la contaminación atmosférica. Las modificaciones de la morfología y la contaminación de las aguas y aire influyen negativamente sobre los suelos, que pueden ser destruidos, degradados o alcanzados por diversos contaminantes lo cual puede ser la desaparición de la vegetación y de microorganismos del suelo.

e) Contaminación ambiental por formas de energía.

Las vibraciones (maquinarias pesadas, explosivos, movimientos de masas de suelo y rocas) pueden también dar lugar a impactos ambientales sobre todo al personal que labora en esta actividad como a los habitantes de zonas residenciales aledañas, de existir estas.

Las características y magnitud de cada uno de ellos dependen en gran medida de la vulnerabilidad y fragilidad del territorio, de la naturaleza del recurso extraído, de las rocas acompañantes, de la magnitud de la explotación, de los métodos de extracción, tratamiento y beneficios utilizados, condiciones hidrogeológicas e hidrológicas de la geomorfología local y de las condiciones climáticas.

2.2.3 Leyes y normas cubanas relacionadas con minería y Medio ambiente.

Ley 81 de Medio Ambiente.

La Ley 81 de Medio ambiente en su artículo 13 establece que los Organismos que tienen a su cargo el uso y administración de recursos naturales, en cumplimiento de sus deberes, atribuciones y funciones específicas relativas a la protección del medio ambiente, deben incorporar y evaluar los requerimientos de la protección del medio ambiente en sus políticas, planes y programas de desarrollo y ejecutar proyectos con vista a garantizar la sostenibilidad de su gestión y contribuir al desarrollo de la vida en un medio ambiente adecuado, valorando científicamente los factores ambientales .

Los artículos 67 y 70 establecen el régimen de sanciones administrativas en materia de protección del medio ambiente que incluye a las personas naturales y jurídicas que incurran en las contravenciones establecidas en la legislación complementaria a la Ley y asevera que toda persona natural o jurídica que por su acción u omisión dañe el medio ambiente está obligada a cesar en su conducta y a reparar los daños y perjuicios que ocasione.

El artículo 92 plantea la obligación de todas las personas naturales y jurídicas en la protección y conservación de las aguas y de los ecosistemas acuáticos en condiciones que permitan atender de forma óptima a la diversidad de usos requeridos para satisfacer las necesidades humanas y mantener una equilibrada interpolación con los demás recursos naturales asegurando un adecuado desarrollo del ciclo hidrológico y de los elementos que intervienen en él, prestando especial atención a los suelos, áreas boscosas, formaciones geológicas y a la capacidad de recarga de los acuíferos.

Las personas naturales o jurídicas, artículo 106, que tienen a su cargo el uso o explotación de los suelos se ajustarán hacer su actividad compatible con las condiciones naturales de estos y con la exigencia de mantener su integridad física y su capacidad productiva y no alterar el equilibrio de los ecosistemas. Adoptaran las medidas que correspondan, tendientes a evitar y corregir las acciones que favorezcan la erosión, salinización y otras formas de degradación o modificación de sus características topográficas y geomorfológicas. Realizar las prácticas de conservación

y rehabilitación que se determinen de acuerdo con las características de los suelos y sus usos actuales y perspectivas. Cumplir las demás disposiciones establecidas en la legislación básica de suelos del país y otras que a su amparo dicten los organismos competentes.

En los artículos 120, 122 y 137 se refieren a que toda actividad minera estará sujeta al proceso de evaluación de impacto ambiental, por lo que el concesionario solicitará la licencia ambiental para ejecutar la fase de explotación. Las personas naturales o jurídicas que desarrollan actividades de aprovechamiento de recursos minerales, estarán en la obligación de rehabilitar las áreas degradadas por su actividad, así como las áreas y ecosistemas vinculados a éstas que puedan resultar dañados, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Minas y en la presente Ley, o en su defecto, a realizar otras actividades destinadas a la protección del medio ambiente, en los términos y condiciones que establezcan el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, el Ministerio de la Agricultura y el Ministerio de la Industria Básica. Las medidas correctivas estarán destinadas a remediar los daños causados al paisaje y, en la medida de lo posible, a recuperarlos o rehabilitarlos y se aplicarán de conformidad con lo dispuesto en la presente Ley y su legislación complementaria.

También en esta Ley el artículo 160 se refiere a que todo inversionista está obligado a asegurar condiciones ambientales que no afecten o pongan en riesgo la salud o la vida de los trabajadores, así como desarrollar las actividades laborales en armonía con el medio ambiente, garantizando además los medios de protección adecuados. El inversionista queda obligado a reparar los daños o perjuicios provocados por el incumplimiento de las obligaciones anteriores.

El Centro de Inspección y Control Ambiental (CICA). Emitió las Guías para la Realización de las solicitudes de Licencia Ambiental y los Estudios de Impacto Ambiental, para los diferentes tipos de proyectos.

Ley 76 de Minas.

La Ley 76 de Minas de enero de 1995 establece en su artículo 40 y 42 que todos los concesionarios están obligados a preservar adecuadamente el medio

ambiente y las condiciones ecológicas del área, elaborando estudios de impactos y planes para prevenir, mitigar, controlar, rehabilitar y compensar el impacto derivado de la actividad minera en los términos que establece la legislación.

En el artículo 57 señala que los concesionarios pueden perder esta condición si no cumplen con el programa de ejecución de las medidas de mitigación y en el 64 y 65 señala la obligación de restaurar con el cierre de la mina.

Ley Forestal.

En la Ley Forestal se precisa que el Ministerio de la Agricultura establece las medidas de control para la protección de la vegetación de las franjas protectoras de los ríos, así como las cuencas hidrográficas, prevé que las franjas son de carácter permanente. También señala la obligatoriedad de la restauración de las áreas degradadas.

Normas cubanas.

A partir de la década de los años 80, el Estado cubano dictaminó la realización del Sistema de Normas Cubanas dirigidas en el orden geográfico, al óptimo ordenamiento territorial del país en consonancia con el necesario equilibrio entre el uso racional de los recursos naturales, la protección y conservación de la naturaleza y la calidad del hábitat humano.

Normas ISO 14000

El Ministerio de la Industria Básica ha trazado la política de que las empresas mineras comiencen a poner en práctica un programa de desarrollo inversionista en la actividad medio ambiental, con el objetivo de dar cumplimiento a las normas ISO 14000.

2.2.4 Situación Ambiental de la Mina de Punta Gorda, Moa, Cuba.

El caso de estudio tomado en la investigación, como nos hemos referido desde el inicio del capítulo, es el yacimiento minero de Punta Gorda, de la fábrica procesadora de níquel Ernesto Che Guevara de Moa, Cuba.

La actividad minera de este yacimiento, que efectúa la minería a cielo abierto, inicia efectuándose un desbroce del terreno y posteriormente un escombreo que retira la parte no útil del mineral, por su bajo contenido de níquel y cobalto, y la sitúa en las inmediaciones de la zona en excavación.

Estos movimientos de tierras representan el primer riesgo de contaminación tanto para las aguas subterráneas, como para las superficiales, el aire y la biota de la región.

Los impactos ambientales asociados a la extracción de mineral son fundamentalmente originados por los cortes en la superficie, que afectan geológica y visualmente el sector. La operación de la mina genera partículas al ambiente producto de las actividades de carga y transporte.

Las alteraciones del suelo en el lugar de la mina afectan la vegetación que en él se sustenta, produciéndose además fenómenos de migración y reubicación de fauna.

Una forma de contaminar a partir de esta faena minera se produce a través de las aguas de lluvia o de cauces de agua que pasan por minas, en cuyo contacto pueden incorporar contenido metálico en el agua o acidificarla. Si estas aguas fluyen a los cauces superficiales o subterráneos existe entonces un riesgo ambiental.

Se generará, además, impacto acústico y polvo en suspensión en el acopio de mineral. Este proceso considera además la utilización de un área, cuya magnitud depende de la cantidad de material procesado, en la que se eliminarían la vegetación y la fauna.

El carácter temporal de la minería, de 20 a 50 años aproximadamente, conlleva

a que se realice un plan de rehabilitación adecuado, teniendo en cuenta que estos proyectos producen daños irreversibles y permanentes, donde las labores de mitigación no siempre serán llevadas a cabo con éxito. Sería prudente llevar una evolución temporal de la actividad minera, de forma tal que se pueda llevar un seguimiento continuo de las labores de minería, así como de cada variable ambiental, que contribuya a la mitigación de los efectos ambientales una vez concluidas las actividades de minería en la zona [26].

El yacimiento Punta Gorda se encuentra desde la década de los 80 bajo la influencia de las actividades mineras, las cuales le han causado daños considerables al medio físico en general, por lo que toda esta área posee un alto grado de deterioro ambiental.

Para realizar la explotación del yacimiento en su totalidad, el área se divide en subáreas más pequeñas, para que se haga un aprovechamiento racional de los recursos minerales de los que se dispone, de cómo se realiza esta división del área de minería comentaremos en epígrafes posteriores.

Según encuestas desarrolladas a los expertos en medio ambiente tomados para desarrollar la investigación, se identificaron 50 impactos que son los provocados por la minería, según su experiencia en este yacimiento, que se describen a continuación, posteriormente estos son divididos en impactos y afectaciones.

1. Alteración del relieve natural

Desde los inicios de las labores mineras el relieve comienza a ser alterado, cada fase superior le infringe una mayor transformación. Es un impacto negativo, de efecto directo, con posibilidades de atenuar y por su significado se valora como crítico.

2. Aumento de las probabilidades de ocurrencia de procesos geomorfológicos degradantes (erosión, deslizamientos, derrumbes).

Su aparición está unida al inicio de los trabajos topográficos y de

perforación geológica, los mismos rompen el equilibrio natural de los terrenos, al retirarse franjas de cobertura vegetal, los procesos degradantes comienzan a manifestarse, es un efecto indirecto, es un impacto negativo, el cual se atenúa, se valora como severo.

3. Incremento de la intensidad de los procesos erosivos.

La actividad de desbroce retira la cubierta vegetal que protege al suelo de la acción de elementos, como el agua y el viento, que al incidir sobre las superficies denudadas intensifican la actuación de los procesos erosivos, es un impacto negativo, de efecto directo, clasificado como severo y tiene posibilidades de mitigarlo en la fase de abandono del proyecto.

4. Remodelación final del relieve, teniendo en cuenta las características que poseía el mismo antes de ser afectado por la minería.

Su aparición está unida a la terminación del proceso de extracción de mineral de un área dada, los estériles serán depositados en las excavaciones de las áreas minadas, la remodelación se hará teniendo en cuenta la topografía natural de esos terrenos, es un impacto positivo de efecto directo, su significación es crítica, es posible recuperar las condiciones originales de proyecto.

5. Pérdida de materia orgánica.

La capa fértil del suelo es retirada y almacenada para su posterior depósito en áreas que van a ser rehabilitadas, esta capa es de muy poco espesor por lo que el proceso de arranque, almacenaje y redeposición de la misma, más la acción de los procesos erosivos conducen a una pérdida de materia orgánica, es un proceso negativo, de efecto directo, con posibilidades de atenuarlo, por su significado se considera moderado.

6. Disminución de los niveles de humedad

Aparece con el desbroce, la destrucción de la capa vegetal del suelo, al no existir esta protección natural, reciben directamente la acción de los rayos solares y del aire, el color oscuro de los suelos favorece el incremento de la absorción de calor y todo esto conlleva a que los niveles de humedad se reduzcan significativamente, es un impacto negativo, de efecto directo y existen posibilidades de mitigar este impacto, se clasifica como severo.

7. Cambios en las propiedades físico-química de los suelos

Los primeros síntomas de cambio en las propiedades de los suelos ocurren fundamentalmente en la primera fase de los trabajos mineros, pierden nutrientes y las características físicas son alteradas totalmente, es un impacto negativo, de efecto directo, por su significado se considera moderado y el mismo se mitiga a lo largo del proyecto.

8. Compactación crítica de los suelos

La compactación de los suelos se produce debido al tráfico de equipos pesados sobre el suelo, este fenómeno aparece desde el desbroce y se acentúa en la construcción de las vías de acceso, su carácter es negativo, su efecto es directo, se valora como moderado y será posible corregir el mismo durante la fase de cierre del proyecto.

9. Remodelación y protección de taludes.

Este impacto aparece durante la fase de abandono, cuando se realizan los depósitos de escombros en las áreas minadas, la remodelación y protección de los taludes se realiza con el objetivo de reducir el grado de pendiente, para vencer los problemas de la erosión o inestabilidad, es un impacto positivo, de efecto directo, considerado como crítico, y el mismo es corregido.

10. Descompactación de los suelos.

En la fase de abandono hace aparición este impacto, forma parte importante de la rehabilitación biológica, ya que garantiza la aireación de las raíces de las plantas y favorece el drenaje del suelo, es de carácter positivo, de efecto directo, con significado crítico, y es posible corregir la compactación que exista.

11. Realización de mejoras edáficas

Este impacto se genera durante la fase de abandono, cuando se realiza la preparación de los terrenos para ejecutar la revegetación de los mismos, esto se debe a la pérdida de nutrientes que sufre el suelo a lo largo del proceso de la minería, es un impacto positivo, de efecto directo, por su valoración es crítico, constituye una medida de mitigación.

12. Cambios en la composición físico-química de las aguas de escurrimiento superficial, debido a la contaminación por incremento de sólidos en suspensión.

Las aguas varían su calidad fundamentalmente en la fase de apertura de la minería, al denudarse los suelos los procesos erosivos se incrementan, fundamentalmente el escurrimiento superficial, arrastrando grandes cantidades de sedimentos que se son depositados en los ríos, arroyos, este impacto es de carácter negativo, su efecto es directo, por su valor es moderado, el mismo es mitigado en la fase de abandono de la minería.

13. Modificación del nivel piezométrico de las aguas.

La extracción minera modifica los niveles piezométricos al destruir sus canales de evacuación, lo que provoca un abatimiento de aguas arriba y una recarga aguas abajo, comienza a manifestarse durante la extracción del mineral, es un impacto negativo, de efecto directo, se clasifica como moderado y el mismo se mitiga durante la ejecución del proyecto.

14. Destrucción de la red de drenaje de las aguas superficiales y subterráneas.

Esta red se destruye entre las actividades de escombreo y desbroce, las aguas son desviadas hacia otras áreas donde no interfieran con las actividades mineras, es un impacto negativo, de efecto directo, por su significación es considerado como moderado, el mismo es posible mitigarlo.

15. Disminución en las aguas de los sólidos en suspensión.

Este impacto se genera en la fase de abandono, cuando la superficie comienza rehabilitarse, la creación de una nueva cobertura vegetal produce una retención de las partículas que arrastra el agua, además culminan las actividades de remoción de los cauces de ríos y arroyos, es un impacto positivo, de efecto directo, considerado como severo y constituye una medida de mitigación.

16. Creación de la red de drenaje de las aguas.

Este impacto hace su aparición desde la actividad de extracción cuando se construyen canales para el drenaje de las aguas que inundan los frentes de trabajo, en la fase de abandono ya se ha conformado una red de acuerdo a los volúmenes de agua que afloran, es un impacto positivo, de efecto directo, considerado como severo, constituye una medida de mitigación.

17. Construcción de depósitos de agua.

La construcción de depósitos de agua es un impacto que hace su aparición en la fase de abandono de la minería, se realizan con el objetivo de mejorar la calidad del paisaje y fundamentalmente para mejorar el desarrollo de la plantas, es un impacto positivo, de efecto directo, por su valor clasifica como severo, constituye una medida muy importante para la mitigación de afectos negativos.

18. Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería.

La aparición de este impacto dado por la destrucción de la cobertura vegetal durante la actividad de desbroce, en la actividad de escombreo este fenómeno se agudiza, conduciendo a un proceso de incremento de la insolación y las temperaturas al dejar de existir la barrera que constituye un filtro de las radiaciones solares, la cual atenúa la incidencia de los rayos solares sobre el suelo, produciéndose una disminución de la humedad y un incremento de la temperatura, es un impacto negativo, de efecto indirecto, se valora como moderado, y el mismo se mitiga durante la fase de abandono.

19. Recuperación gradual de los parámetros afectados del microclima por la minería.

En la fase de abandono de las actividades mineras, se realiza la rehabilitación biológica del suelo, al implantar la cobertura vegetal ocurre un proceso de recuperación gradual de todos los parámetros que fueron afectados, es un impacto positivo, de efecto indirecto, por su valor clasifica como severo y constituye una medida de mitigación.

20. Aumento de los niveles de polvo sedimentable en el aire, producto a las labores de la minería.

La aparición de este impacto está unido fundamentalmente con la actividad de transporte de mineral con camiones de gran porte, los cuales durante su circulación levantan nubes de partículas finas, fundamentalmente en las épocas de sequía, es un impacto negativo, de efecto directo, valorado como moderado.

21. Incremento de los niveles de contaminación por gases de escape de los motores de combustión interna.

Este impacto se genera al circular grandes cantidades de equipos de

manera concentrada, su aparición está unida fundamentalmente a la fase de operación del proyecto, es de carácter negativo, su efecto es directo, se caracteriza como moderado y el mismo puede mitigarse.

22. Contaminación sónica.

Este impacto está asociado desde las primeras actividades de la minera hasta la fase de abandono, la maquinaria minera se caracteriza por poseer motores potentes que generan altos decibeles, constituye un impacto negativo, de efecto directo, valorado como moderado y el mismo es mitigado en la fase de abandono.

23. Disminución de los niveles de polvo, producto a la rehabilitación biológica.

Este impacto aparece en la fase de abandono, la nueva cobertura vegetal atenúa la acción del polvo, al crear un nuevo sustrato que impide la acción del aire sobre el mismo, es un impacto positivo, de efecto directo, se valora como severo y constituye una medida de mitigación.

24. Disminución de las concentraciones de polvo por el riego sistemático de agua en las vías de acceso.

Este impacto aparece desde la fase de apertura del proyecto, constituye una medida muy importante por las consecuencias que puede generar de no ejecutarse adecuadamente, es un impacto positivo, de efecto indirecto, clasifica como crítico y es una acción de mitigación.

25. Atenuación de la contaminación por gases en la fase de abandono.

Cuando el proyecto entra en su fase de abandono, disminuye la circulación de los equipos automotores y por tanto la contaminación por gases, es un impacto positivo, de efecto indirecto, clasifica como severo y constituye una medida de mitigación de impactos negativos.

26. Mitigación de la contaminación sónica

Este impacto ocurre en la fase de abandono de las labores mineras, momento en el que se retira la maquinaria, por lo que la contaminación sónica disminuye significativamente, es un impacto positivo, de efecto indirecto, valorado como severo, constituyendo una medida de mitigación.

27. Tala de árboles y arbustos

La tala de árboles y arbustos es un impacto que aparece durante la fase de apertura, se realiza con el objetivo de dar a provechar los recursos maderables que poseen las futuras áreas de minería, es un impacto negativo, de efecto indirecto, el mismo posee medidas para su mitigación.

28. Destrucción de la cubierta vegetal

La actividad de desbroce genera la destrucción de la cubierta vegetal, es un impacto negativo, de efecto directo, es valorado como severo y el mismo es mitigable.

29. Destrucción y fragmentación de hábitat de la flora, vegetación y fauna

Desde la fase de apertura paulatinamente se generan impactos que deterioran los ecosistemas, provocando la destrucción del hábitat de la biota en general, es un impacto negativo, de efecto directo, se clasifica como severo y su efecto es mitigable.

30. Destrucción de especies endémicas

En la fase de apertura del proyecto se destruyen ecosistemas que contienen un por ciento importante de especies endémicas, es impacto negativo, de efecto directo, por significado se valora como severo y el mismo es mitigable a largo plazo.

31. Afectación a la diversidad

El yacimiento Punta Gorda forma parte de la zona norte oriental con un alto grado de diversidad, las labores mineras causan daños muy importantes a esos ecosistemas, es un impacto negativo, de efecto directo, considerado como moderado, y el mismo es mitigable.

32. Realización de rehabilitación biológica.

Este impacto es generado en la fase de abandono del proyecto, la rehabilitación biológica se realizará con especies endémicas de la región, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como crítico y es una medida de mitigación.

33. Revegetación espontánea de algunas especies vegetales.

Este impacto es generado durante la fase de abandono de la minería, a medida que se desarrollan la vegetación implantada, se crean las condiciones adecuadas para la introducción de especies propias de estas áreas, es un impacto positivo, de efecto indirecto, valorado como moderado y constituye una medida de mitigación.

34. Migración de especies animales

Cuando se inician las labores más agresivas al medio (como el desbroce) cambian bruscamente los hábitat de los animales, por lo que se ven obligados a migrar hacia áreas más favorables, es un impacto negativo, de efecto indirecto, valorado como severo, y el mismo es mitigable a largo plazo.

35. Destrucción de la microfauna

Este impacto es generado durante la fase de apertura de la minería, la microfauna es muy sensible a los cambios del ecosistema, al retirarse la capa vegetal, comienza un proceso que conduce a la destrucción casi total de la microfauna, es un impacto negativo, de efecto directo, valorado como severo y

el mismo es mitigable.

36. Aparición de algunas especies animales (reptiles y aves pequeñas)

Este impacto es generado durante la rehabilitación de las áreas minadas, al existir condiciones adecuadas (como alimentación) los animales retornan a su territorio de origen, esto va ocurriendo gradualmente, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como moderado, y el mismo es una medida de mitigación.

37. Deterioro de la calidad del paisaje

La minería deteriora severamente el paisaje, al destruir o afectar los elementos fundamentales del mismo, es un impacto negativo, de efecto directo, valorado como severo, y el mismo es mitigable.

38. Mejoramiento de la calidad paisajística.

En la fase de abandono de la minería se crean condiciones que mejoran la calidad del paisaje, tales como: creación de cuerpos de agua, remodelación de la superficie, revegetación, pantallas vegetales, etc., es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como crítico, es una medida de mitigación.

39. Cambio del uso del suelo (de forestal a minero)

Las áreas del proyecto son áreas clasificadas por las características de sus suelos como áreas forestales, por la importancia de los recursos minerales que contienen las mismas para nuestro país son utilizadas como zonas de extracción minera, es un impacto positivo, de efecto directo, el mismo es mitigable.

40. Entrega de las áreas rehabilitadas al patrimonio forestal.

Durante la fase de abandono de las labores mineras, se rehabilitan las áreas minadas con las especies de los ecosistemas que existían antes de la minería, en el transcurso de 3 años estas áreas son devueltas a la Empresa

Forestal, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como severo, el mismo es una medida correctora.

41. Aumento del riesgo de enfermedades y molestias por la acción del polvo.

Durante el tráfico de camiones, la contaminación de la atmósfera con partículas de polvo causa molestias e incrementa las posibilidades de la aparición de enfermedades respiratorias, este impacto incide fundamentalmente en los trabajadores mineros y en menor grado en la comunidad La Veguita, es un impacto negativo, de efecto indirecto, valorado como moderado, el mismo es mitigable.

42. Atenuación de las afectaciones por la acción del polvo.

Este impacto se genera durante la fase de abandono, el cumplimiento de medidas de mitigación y el retiro de los equipos de las áreas conduce a que las afectaciones por la acción del polvo disminuyan sensiblemente, es un impacto positivo, de efecto indirecto, valorado como severo, es una medida de mitigación.

43. Incremento de la red vial y eléctrica

En la fase de apertura de la minería se genera este impacto, el mismo tiene por objetivo garantizar el acceso y suministro eléctrico del equipamiento minero a los frentes de trabajo, es un impacto negativo, de efecto indirecto, valorado como moderado, este impacto es corregible.

44. Incremento del empleo fijo

Este impacto es generado durante la fase de apertura del proyecto, se debe a la demanda de fuerza de trabajo producto al incremento de los volúmenes de extracción, haciéndose necesario la adquisición de nuevos equipos de trabajo, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como severo, el mismo es mitigable.

45. Incremento de las ganancias por la extracción y transportación de mineral.

Este impacto se genera durante la fase de operación del proyecto, la importancia estratégica del Níquel, conduce a la venta a precios atractivos, que producen ganancias altas para el país, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como crítico, el mismo es corregido al terminar la minería.

46. Creación de empleos temporales.

La aparición de este impacto está ligado a todas las fases del proyecto, estos empleos temporales, se deben a la gran cantidad de equipos que son necesarios para garantizar las actividades mineras, y que la mina al no contar con el mismo, realiza subcontrataciones y alquila equipos, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como moderado, el mismo es mitigable.

47. Realización de inversiones.

Este impacto está unido a todas las fases del proyecto, el mismo se genera por la necesidad fundamental de adquirir equipamiento en la todas las actividades mineras, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como severo.

48. Incremento del valor del suelo.

Este impacto se genera por la importancia de los recursos minerales que contienen los suelos del territorio, valor muy superior económicamente a la de los recursos forestales que contienen los mismos antes de la minería., es un impacto positivo, de efecto directo, valorado como severo, el mismo es mitigable.

49. Mejoras en las condiciones de vida de los trabajadores.

Este impacto está asociado a la toda la vida del proyecto, los trabajadores mejoran sus condiciones de vida al contar con los medios de protección personal e industrial adecuados, además de recibir salarios más atractivos, es un impacto

positivo, de efecto directo, valorado como severo.

50. Incremento de las posibilidades de intervención de empresas de servicios.

Este impacto está ligado a todas las fases del proyecto, resulta más económico para las empresas productoras contar con empresas de servicios que se encarguen de todas las actividades de apoyo a la producción, es un impacto positivo, de efecto directo, valorado por su significación como severo.

Estos impactos son provocados por las actividades que se llevan a cabo una vez que se decide minar un yacimiento, estas varían en dependencia del tipo de minería, en nuestro caso, estas son las actividades relacionadas con el proceso de la explotación del mineral:

I.-Apertura

1. Trabajos topográficos.
2. Trabajos de perforación geológica
3. Desbroce.
4. Construcción de vías de acceso
5. Escombreo

II. Operación

6. Extracción de mineral.
7. Transporte de maquinarias y equipos.
8. Transporte de mineral
9. Mantenimiento de caminos

III. Abandono

10. Rehabilitación de áreas minadas.

Basándonos en la minería como actividad impactante del medio y en las investigaciones que se han desarrollado en el ámbito del medio ambiente relacionada

con ella, además de la importancia de integrar en la evaluación de impacto la teoría de conjunto difusos, en nuestra investigación hemos desarrollado una metodología que reúne estos aspectos, la cual describimos en el próximo capítulo.

CAPITULO 3. UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS MINEROS.

Introducción

La zona del nordeste oriental de Cuba, se caracteriza por grandes yacimientos de níquel, cobalto, hierro, entre otros minerales en menor cuantía. El yacimiento que nos ocupa, enclavado en la región de Punta Gorda, perteneciente a la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, en el municipio de Moa, es sometido a continuas investigaciones ambientales. El Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, enclavado en esta zona minera, cuenta con un Centro de Estudios de Medio Ambiente (CEMA), en el cual sus miembros se encargan de realizar estas investigaciones, principalmente las que se relacionan con las evaluaciones de impacto ambiental.

En este centro, las evaluaciones de impactos desarrolladas, siguen de forma sintetizada la metodología matricial de Conesa, es decir, no realizan las evaluaciones siguiendo fielmente cada una de sus etapas, debido fundamentalmente a que cuentan con evaluaciones desarrolladas sobre proyectos similares en la misma zona. Teniendo como base estos antecedentes, decidimos realizar en la investigación una metodología que permita una mejor adaptación a las labores desarrolladas actualmente por los investigadores del CEMA.

Basados en la problemática que ocasiona la minería al medioambiente, y la necesidad de realizar evaluaciones medioambientales en cada una de las etapas de la explotación, además de lo que planteamos anteriormente sobre el modo de realizar las evaluaciones de los investigadores del CEMA, se desarrolla una metodología basada en los fundamentos generales descritos en el Capítulo 1, que emplea la Teoría de Conjuntos Difusos, integrando en ella además, la posibilidad de conocer el comportamiento de las variables del medio, a partir del valor de efecto ambiental global que se desea alcanzar.

3.1 Metodología Jerárquica-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental. Propuesta para la EIA en la minería de Moa.

En capítulos anteriores se ha mostrado la conveniencia de incorporar Técnicas Difusas en los Estudios de Impacto Ambiental, argumentando para ello, principalmente, que la mayoría de las variables involucradas están definidas de forma vaga, debido a que se trata de predicciones sobre los valores que podrán tomar.

También planteamos cómo se realizan las evaluaciones de impacto ambiental en el proyecto tomado como caso de estudio, que nos sirvió como base para el desarrollo de una metodología que reúna determinadas características.

La metodología desarrollada esta basada en la matricial de Conesa, la cual es la que se emplea actualmente en las evaluaciones desarrolladas en el yacimiento minero seleccionado, por lo que también hereda el carácter matricial de la misma. Hemos incluido el carácter jerárquico, en el sentido primeramente, en que para la determinación del efecto ambiental global del proyecto que se evalúa, se realiza una estructura jerárquica, que describimos más adelante en el capítulo. Esta surge como consecuencia de la división en equipos de trabajo de los expertos en medio ambiente que realizan las evaluaciones, especializados en cada factor o conjunto de factores. De esta forma los especialistas en un factor determinado identifican los impactos que lo afectan, además que son los encargados de valorarlos. Esta estructura nos permite ir de lo general a lo particular. Otro aspecto que determina el carácter jerárquico de la metodología es la estructura de los factores ambientales, que se toma de la división del medio que se realiza en la metodología que tomamos como antecedente. Finalmente la estructuración del área de la explotación minera, también responde a una estructura por niveles.

Las evaluaciones que se realizan actualmente en el yacimiento minero de Punta Gorda, no se realizan en la totalidad del área, sino que se hacen divisiones en áreas más pequeñas. Esto hace que la identificación de los impactos ambientales que provoca la actividad minera, en su mayoría, ya se hallan listado en la evaluación de una zona anterior (cada zona constituye un proyecto ambiental). Los expertos cuentan con una lista de los impactos ocasionados por la actividad en alguna evaluación ya desarrollada,

y cuando se enfrentan a un proyecto nuevo seleccionan de la lista los que coincidan con el proyecto a evaluar, y en algún caso incluyen alguno nuevo. Por esto en nuestra metodología incluimos entre uno de sus pasos la identificación de los impactos mediante una lista de chequeo simple, de forma tal que sea aprovechada la información con la que se cuenta de evaluaciones anteriores.

En el proceso de evaluación de impacto, se obtienen dos valores, la importancia y la magnitud del impacto. Para los expertos es necesario además de estos dos valores, tener una medida que los unifique, lo que en la metodología desarrollada denominamos Efecto Ambiental, determinado para cada impacto ambiental (efecto ambiental parcial) y para el proyecto en general (efecto ambiental global), este último se determina a partir de la agregación por niveles de los valores obtenidos en la estructura jerárquica que define la metodología, una explicación más detalla se realiza en epígrafes posteriores.

Cuando se emprende la realización de una actividad, en nuestro caso de minería, se necesita conocer en la mayor brevedad toda consecuencia ambiental en el ciclo del proyecto y tenerla en cuenta para el diseño del mismo. Además, de forma temprana se necesita conocer si sería necesario imponer limitaciones al proyecto, teniendo en cuenta que las autoridades legales exigen determinadas características del mismo en cuanto a lo que a afectación del medio se refiere. Estas cuestiones nos llevaron a incluir en la metodología jerárquica-matricial lo que denominamos diseño de proyectos ambientales, a partir de un valor de efecto ambiental global deseado. La posibilidad de diseñar proyectos ambientales también se ha tenido en cuenta como una forma de mitigar el efecto ambiental de la explotación del yacimiento al medio, apoyándonos en la división del proyecto en áreas una vez obtenida la evaluación de alguna de estas. Para disminuir la afectación al medio por parte del proyecto, se puede realizar un diseño de la forma en que debería afectar el área que se pondrá en explotación (valor de efecto deseado), de forma tal que se equilibre la afectación del área total del proyecto, a partir de cada una de las áreas ya evaluadas.

Otro aspecto que colabora con la mitigación de las afectaciones al medio es el seguimiento continuo del comportamiento de las variables ambientales, su evolución temporal, por lo que en la metodología son incluidas comparaciones temporales de

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

evaluaciones de impacto.

En resumen, podemos destacar, que con las encuestas y entrevistas realizadas a los investigadores del CEMA, así como el estudio de su comportamiento para efectuar evaluaciones de impacto ambiental, la metodología desarrollada surge para:

- Formalizar la metodología de trabajo de los expertos en medio ambiente que realizan las evaluaciones del caso de estudio seleccionado.
- Colaborar con el trabajo en equipo del grupo de expertos involucrados en el proceso de evaluación.
- Emplear información de evaluaciones de impacto realizadas con anterioridad.
- Combinar los valores de la magnitud y la importancia del impacto.
- Diseñar proyectos ambientales como necesidad para:
 - Satisfacer los requerimientos de las autoridades en cuanto al modo en que debe afectar el proyecto.
 - Colaborar con la mitigación de los impactos ambientales a partir de las evaluaciones desarrolladas a diferentes áreas del proyecto y llevando a cabo la evolución temporal del proyecto.
- Incorporar en el proceso de evaluación de impacto ambiental la Teoría de Conjuntos Difusos.

A partir de la necesidad planteada, la metodología desarrollada cuenta con las siguientes etapas:

1. Describir el Medio Ambiente como un conjunto de factores ambientales distribuidos jerárquicamente.
2. Describir la actividad o proyecto que se evalúa como un conjunto de acciones distribuidas jerárquicamente.
3. Identificar los impactos que cada acción tiene sobre cada factor medioambiental.
4. Caracterizar cada impacto mediante la estimación de su importancia.
5. Caracterizar cada impacto mediante la estimación de la magnitud.

6. Determinar efecto ambiental individual de cada impacto.
7. Analizar el efecto ambiental global del proyecto sobre el medio utilizando para ello los efectos ambientales individuales de cada impacto.
8. Hacer una división de la zona que ocupa el proyecto teniendo en cuenta un determinado criterio, distribuir la subdivisión del área jerárquicamente.
9. Hacer evaluaciones temporales del proyecto.
10. Definir el efecto ambiental global del proyecto para determinar el comportamiento de los factores ambientales durante el desarrollo de la actividad.

Las 2 primeras etapas se realizan de igual forma que en la metodología crisp planteada en el capítulo anterior. En el caso de la tercera etapa se lleva a cabo empleando una Lista de Chequeo Simple, esta y las demás etapas son expuestas a continuación.

3.1.1 Identificación de los impactos que cada acción tiene sobre cada factor medioambiental.

A los expertos en medio ambiente, que en este caso realizarían la evaluación de un proyecto de minería, se les presenta una lista descriptiva de impactos ambientales que afectan a cada uno de los factores ambientales que se describieron en la etapa anterior, estos realizan una selección teniendo en cuenta los que presenta su proyecto.

Queda de parte del experto determinar que acción de su proyecto, es la que provoca el impacto identificado, teniendo en cuenta, desde luego, las acciones del proyecto que describió en su momento.

3.1.2 Caracterización de cada impacto mediante la estimación de su importancia.

Una vez determinados los factores y las acciones e identificados los impactos que estas últimas tienen sobre los primeros se debe determinar, primeramente, la Importancia de cada impacto ambiental.

La expresión que determina la importancia en nuestra metodología es:

$$I_{i,j} = 3IN^{i,j} + 2EX^{i,j} + MO^{j,j} + PE^{i,j} + RV^{i,j} + SI^{i,j} + AC^{i,j} + EF^{i,j} + PR^{j,j} + MC^{i,j} \quad (1)$$

donde cada una de las variables que intervienen tienen el mismo significado que en la metodología crisp planteada, a diferencia que no serán tratadas como variables numéricas, sino como variables lingüísticas representadas mediante números difusos y el cálculo de la importancia se realiza utilizando aritmética difusa, ambos aspectos relacionados con la Teoría de Subconjuntos difusos. (Ver anexo A1)

3.1.3 Caracterización de cada impacto mediante la estimación de su magnitud.

Siguiendo el criterio de los expertos se ha hecho una selección de los diferentes indicadores ambientales que miden la calidad ambiental de cada uno de los factores del medio. Para esto se tuvo en cuenta los valores permisibles de estos según las normas internacionales. Se determinaron en total 40 indicadores ambientales.

Para la determinación de la magnitud el equipo que realiza la evaluación debe ser multidisciplinar, de forma tal que existan expertos en cada uno de los factores identificados, los cuales deben de ser capaces de una vez medidos los indicadores ambientales cuantitativos y valorados los cualitativos interpretar los resultados de forma satisfactoria, permitiendo una evaluación de efecto ambiental global exitosa.

Aire

1. Concentración de Monóxido de carbono (CO)
2. Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NO₂)
3. Concentración de Dióxido de Azufre (SO₂)

4. Concentración de Ozono
5. Material particulado (PM₁₀, PM₂₅, Polvo)
6. Ruido

Agua

7. Partículas en suspensión
8. Turbidez
9. Ph
10. Temperatura

Suelo

11. Superficie afectada por la erosión del suelo
12. Nivel de humedad
13. Pendiente por superficie afectada
14. Espesor de capa fértil (Materia Orgánica)
15. Salinidad
16. Ph

Clima

17. Temperatura
18. Cantidad de precipitaciones

Flora y Vegetación

19. Diversidad
20. Especies amenazadas
21. Cantidad de árboles observables
22. Porcentaje de superficie cubierta

Fauna

- 23. Especies amenazadas
- 24. Diversidad de especies
- 25. Movilidad de especies

Paisaje

- 26. Cantidad de árboles observables
- 27. Calidad visual
- 28. Calidad del paisaje
- 29. Diversidad de Especies

Uso del suelo

- 30. Uso del suelo

Población

- 31. Salud e higiene
- 32. Nivel de empleo

Infraestructura

- 33. Nivel de afectación por construcción de redes eléctricas

Economía

- 34. Nivel de empleo
- 35. Incremento de los ingresos
- 36. Nivel de inversiones
- 37. Valor del suelo
- 38. Calidad de vida

Geología y Geomorfología

- 39. Carácter del relieve
- 40. Erosión

Para determinar la magnitud de una acción sobre un factor determinado, los especialistas en el factor en cuestión llevan a cabo las siguientes tareas:

1. Realizan las mediciones de cada uno de los indicadores ambientales que han seleccionado por cada factor ambiental, en caso de ser cualitativos estos son valorados.
2. Según el valor tomado por el indicador ambiental, ya sea numérico o lingüístico, basados en los límites permisibles para ese indicador realizan una valoración.
3. Comparan el valor obtenido por el indicador respecto al valor óptimo o al perjudicial y califican cualitativamente el indicador, teniendo en cuenta determinadas etiquetas lingüísticas.
 - a. Según los valores obtenidos por los indicadores (cualitativos), realizan una valoración en términos de la magnitud por cada impacto, obteniéndose así la magnitud parcial del impacto ambiental y determinan la calidad del factor ambiental.
 - b. Cuando obtienen el valor cualitativo de magnitud por cada indicador para determinar la calidad del factor toman el mayor valor de magnitud obtenido.

En la metodología Jerárquico-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental, se determina la magnitud del impacto ambiental como sigue:

1. Los indicadores ambientales definidos por los expertos por cada uno de los factores ambientales, pasan a ser variables lingüísticas, cuyas etiquetas lingüísticas son representadas como números difusos. Las etiquetas lingüísticas utilizadas por los expertos en sus valoraciones se toman como los valores de las variables lingüísticas definidas.

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

2. Se busca a que factor o factores afecta el impacto al que se le desea determinar la magnitud y se miden o valoran cada uno de los indicadores definidos para ellos.
3. Con las mediciones o valoraciones de los indicadores ambientales, se busca el grado de pertenencia de cada valor medido a los conjuntos difusos pertenecientes a las etiquetas lingüísticas de la variable lingüística correspondiente al indicador ambiental, obteniéndose por cada una un conjunto difuso.
4. Debido a que cada indicador esta expresado en unidades diferentes, deben ser unificados para obtener la magnitud:
 - 4.1. Se definen 5 prototipos correspondientes a la variable lingüística Magnitud, asociados a las etiquetas lingüísticas: Nulo, Aceptable, Moderado, Severo y Crítico.
 - 4.2. Se establecen semejanzas de los valores de cada una de las variables lingüísticas asociadas a los indicadores ambientales, con los 5 prototipos determinados. Tomando como ejemplo la variable lingüística Concentración de CO, cuyos etiquetas correspondientes son: Bueno, Moderado, Malsano para grupos de personas sensibles, Malsano, Muy Malsano y Peligrosa, la asociación de semejanza con las etiquetas de la variable Magnitud realizada es: a Bueno se le asocia Aceptable, a Moderado, Malsano y Malsano para grupos sensibles se le hace corresponder Severo y para el caso de Muy Malsano y Peligroso la semejanza sería Critico. Incluyendo inicialmente el valor de la etiqueta de Nulo. En el Anexo A2 se muestran todas las asociaciones de semejanzas realizadas para cada variable lingüística respecto a la variable Magnitud.
5. Teniendo los valores de cada variable correspondiente a los indicadores ambientales por cada impacto ambiental, la magnitud del mismo sería el mayor valor obtenido, de esta forma se asegura que se reflejen los impactos más significativos.
 - 5.1. Para determinar el mayor valor obtenido entre etiquetas lingüísticas, a cada valor de la variable Magnitud se le ha asignado un valor numérico que determina su nivel de relevancia. Por lo que a Nulo se le asigna 1, a Aceptable 2, Moderado 3, Severo 4, y Critica 5.

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Tomemos como ejemplo el factor aire, afectado por el impacto “Emisiones de polvo a la atmósfera”, de los indicadores que lo afectan, escogeremos solo 3, Concentración de Monóxido de carbono (CO), Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NO₂) y Concentración de Dióxido de Azufre (SO₂). Los valores de cada indicador se muestran en la Tabla 3.1, medidos en µg/m³, en el Anexo A2 se muestran los valores y las etiquetas de todos los indicadores ambientales que se consideran en la investigación:

	Bueno	Moderado	Malsano sensibles	Malsano	Muy malsano	Peligroso
Concentración de CO	0-5,5	5,5-11,77	11,77-15,6	15,6-19,26	19,26-38	38-50,5
Concentración de SO₂	0-98	98-412	412-641	641-870	870-1728	1728-2300
Concentración de NO₂	0-320	320-653	653-924	924-1330	1330-2542	2542-4182

Tabla 3.1: Ejemplo de valores numéricos para cada etiqueta lingüística de los indicadores

La valoración asignada a cada indicador es la siguiente: el indicador Concentración de CO al ser medido obtuvo el valor de 9 µg/m³, lo que corresponde a la etiqueta Moderado, que una vez llevado a las etiquetas de la variable lingüística magnitud se obtiene la etiqueta Moderado. La medición del indicador Concentración de SO₂, arrojó el valor de 430 µg/m³, malsano para grupos de personas sensibles, equivalente a una magnitud Severa. Por último, el indicador Concentración de NO₂, obtuvo en la medición el valor de 230 µg/m³, bueno y Aceptable para el caso de la etiqueta magnitud.

Como resultado obtenemos que la Magnitud del impacto “Emisiones de polvo a la atmósfera”, sobre el factor Aire es Severa, por ser el mayor valor obtenido.

3.1.4 Determinar Efecto Ambiental individual de cada impacto. Matriz de Efectos Ambientales.

Una vez determinados los valores de la importancia y la magnitud de cada uno de los impactos y afectaciones ambientales identificados, queda consignada la Matriz de Efectos Ambientales del Proyecto. Las filas corresponden a los factores distribuidos

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

jerárquicamente y las columnas corresponden a las Acciones también ubicadas de forma jerárquica, siguiendo la misma filosofía de metodologías matriciales desarrolladas. En la celda ij de la Matriz se consigna el Efecto Ambiental E_{ij} que provoca la acción A_j sobre el factor F_i , calculado a partir de la Importancia I_{ij} del Impacto y la magnitud del mismo M_{ij} . También se encuentran los valores de la Importancia y la Magnitud. A cada impacto se le asignara un peso, según la trascendencia del mismo.

Para determinar el Efecto Ambiental individual de cada uno de los impactos ambientales:

$$E_{ij} = I_{ij} \cdot M_{ij} \quad (2)$$

Factores	Acciones				Totales
	A_1		A_j	A_m	
F_1	E_{11}		E_{1j}	E_{1m}	
F_i	E_{i1}		E_{ij}	E_{im}	
F_n	E_{n1}		E_{nj}	E_{nm}	

Tabla 3.2: Matriz de Efectos Ambientales.

Interpretación de la Matriz de Efectos Ambientales

Por cada fila y columna de la matriz se obtienen la importancia, magnitud y efecto ambiental parcial de cada uno de los impactos y los totales por filas y columnas de la importancia, magnitud y efecto ambiental.

Los impactos cuyos resultados de su efecto ambiental parcial sea irrelevante, serán desestimados del análisis del efecto ambiental global, además de hacer una identificación y un tratamiento particular a aquellos impactos que sean muy severos o críticos.

Con los valores parciales del efecto ambiental por cada uno de los impactos se obtienen:

- Importancia de los efectos debidos a la acción A_j : $E_{A_j} = \sum_{i=1}^n E_{ij}$
- Importancia de los efectos sufridos por el factor F_i : $E_{F_i} = \sum_{j=1}^m E_{ij}$

La matriz también brinda la información de la importancia y magnitud.

Agregación de los valores de Importancia

Se realizan sumas ponderadas por filas y columnas de la matriz de efectos, donde también se tienen los valores de la importancia. Con la suma ponderada de las columnas se podrá identificar las acciones menos dañinas, las más dañinas y las beneficiosas que afectan el proyecto.

Los resultados de esta interpretación de las importancias parciales, pueden ser comparados con otros resultados obtenidos en otras alternativas de proyecto.

Se tiene en cuenta que es una matriz de n factores y m acciones.

De esta matriz, en forma general podemos obtener información relacionada con:

- Importancia de los impactos provocados por la acción A_j : $I_{A_j} = \sum_{i=1}^n I_{ij}$
- Importancia de los impactos recibidos por el factor F_i : $I_{F_i} = \sum_{j=1}^m I_{ij}$
- Importancia Total del proyecto: $I_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}$

Agregación de los valores de la Magnitud

La magnitud equivale a medir la cantidad de factor que ha sido afectado. Un mismo factor ambiental puede ser impactado simultáneamente por varias acciones del proyecto. La magnitud del impacto total que ese factor recibe, es el resultado de la

agregación de las magnitudes de los impactos individuales, es decir, $M_j = \sum_{i=1}^n M_{ij}$.

3.1.5 Determinación del Efecto Ambiental Global. Jerarquía de evaluación de efectos.

Se representa una estructura jerárquica de efectos, con dos nodos fundamentales: Ecológicos (N_1) y Humanos (N_2). El nodo N_2 , se divide en personas que intervienen en el proyecto y personas que viven en áreas aledañas al proyecto. En el caso de los ecológicos, se dividen además en afectaciones ambientales e impactos ambientales. Las afectaciones ambientales son las modificaciones que provoca el proyecto a procesos ambientales y los impactos ambientales son las modificaciones que provoca el proyecto a la calidad ambiental. Se hace una clasificación de los impactos ambientales seleccionados y su ubicación en cada una de las ramas de la jerarquía. Así mismo con los impactos ambientales que afectan la salud humana. La estructura jerárquica cuenta con 4 niveles, siendo el último los impactos y afectaciones particulares del proyecto (Figura 3.1).

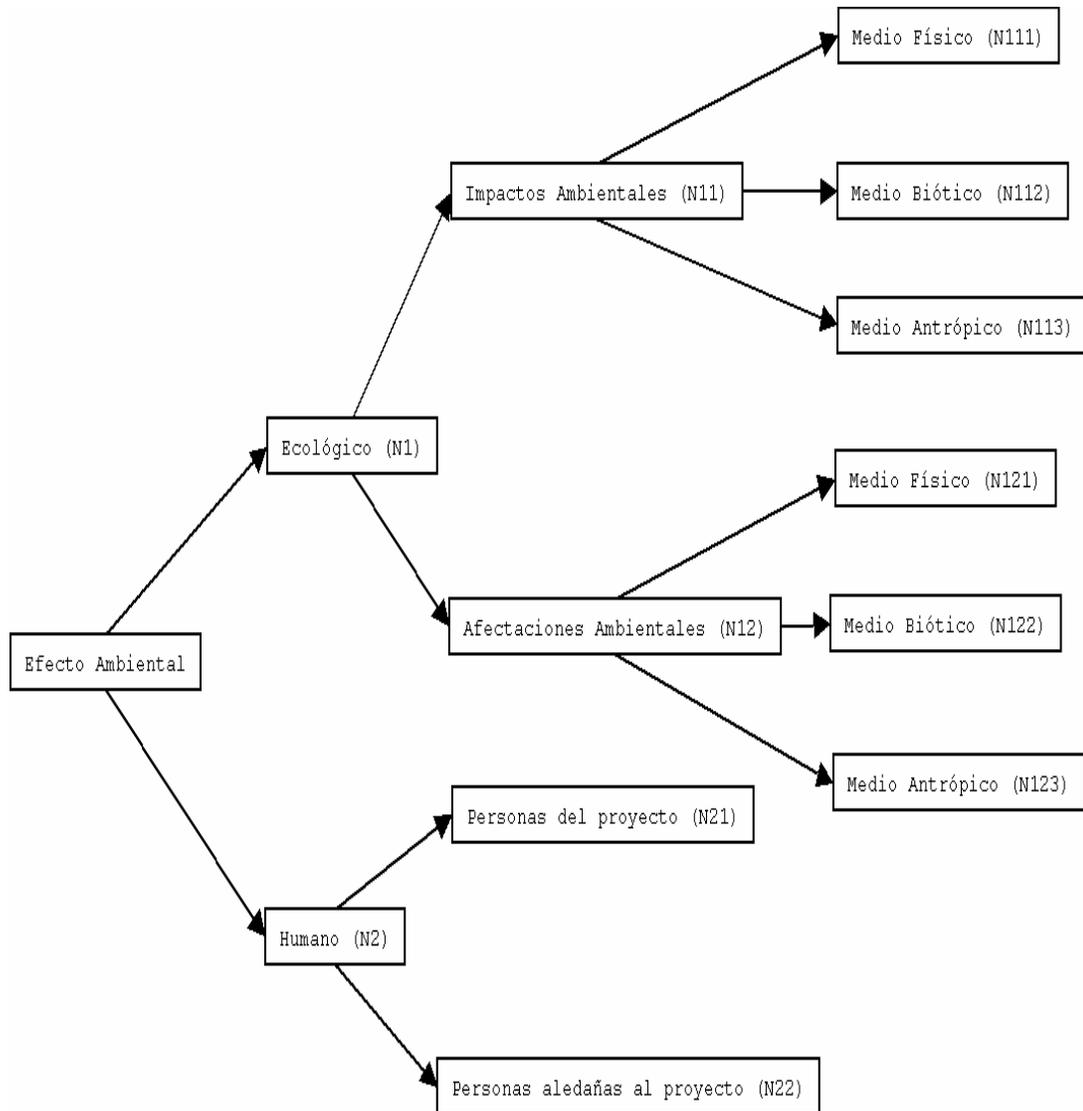


Figura 3.1: Jerarquía de Efecto Ambiental

Los nodos del último nivel del árbol (listados más abajo en este documento) serán los impactos ambientales que provoca la minería, cuyos efectos particulares se calculan en la matriz de efectos ambientales.

1. Afectaciones Ambientales Físicas

- a. Alteración de las propiedades del suelo.
- b. Alteración de la topografía local.

- c. Alteración de la red hidrográfica.
- d. Alteración del régimen hidrológico
- e. Aumento de la erosión
- f. Aumento de la carga de sedimentos en los cuerpos de agua
- g. Producción de rocas estériles
- h. Producción de colas
- i. Producción de residuos sólidos
- j. Emisión de ruido
- k. Emisión de vibraciones y sobrepresión atmosférica
- l. Dispersión de efluentes líquidos
- m. Rebajo o elevación del nivel freático
- n. Subsistencia
- o. Aumento de los riesgos de resbalo de taludes

2. Afectaciones Ambientales Bióticas

- a. Interferencia sobre procesos biológicos en los cuerpos de agua (e.g. ciclaje de nutrientes)
- b. Eutrofización de cuerpos de agua
- c. Bioacumulación de contaminantes
- d. Fragmentación de la cobertura vegetal
- e. Supresión de la cobertura vegetal

3. Afectaciones Ambientales Antrópicas

- a. Modificación de la infraestructura de servicios
- b. Desplazamiento de asentamientos humanos
- c. Inducción de flujos migratorios
- d. Modificación de formas de utilización del suelo
- e. Alteración o destrucción de sitios de interés cultural o turístico
- f. Aumento del tráfico de vehículos
- g. Aumento de la demanda de productos y servicios
- h. Aumento de la oferta de trabajo

4. Impactos Ambientales sobre Medio Físico

- a. Alteración de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas
- b. Alteración del régimen de escurrimiento de las aguas subterráneas

- c. Alteración de la calidad del aire
- d. Alteración de la calidad del suelo
- e. Alteración de las condiciones climáticas locales

5. Impactos Ambientales sobre Medio Biótico

- a. Alteración o destrucción de hábitat terrestres
- b. Alteración de hábitat acuáticos
- c. Reducción de la productividad primaria de los ecosistemas
- d. Reducción de la disponibilidad de nutrientes
- e. Desplazamiento de la fauna
- f. Pérdida de especímenes de la fauna
- g. Creación de nuevos ambientes
- h. Proliferación de vectores

6. Impactos Ambientales sobre el Medio Antrópico

- a. Impacto visual
- b. Sustitución de actividades económicas
- c. Incremento de la actividad comercial
- d. Aumento local de precios
- e. Aumento de la población
- f. Sobrecarga de la infraestructura de servicios
- g. Expansión de la infraestructura local y regional
- h. Pérdida de patrimonio cultural
- i. Pérdida de referencias espaciales a la memoria y cultura popular
- j. Reducción de la diversidad cultural
- k. Alteración en los modos de vida tradicionales
- l. Alteración en las relaciones socio-culturales
- m. Limitación de las opciones de uso del suelo
- n. Aumento de la recaudación de tributos
- o. Calificación profesional de la mano de obra local

Agregación de los Efectos Ambientales para la EIA Global.

El Efecto Ambiental de cada uno de los impactos y afectaciones (último nivel de la estructura jerárquica) se muestra en la Matriz de Efectos Ambientales y los cálculos para cada uno de los niveles de la jerarquía serían:

$$E_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k,1}E_{i,j,k,1} + P_{i,j,k,2}E_{i,j,k,2} + \dots + P_{i,j,k,r}E_{i,j,k,r}}{P_{i,j,k,1} + P_{i,j,k,2} + \dots + P_{i,j,k,r}} \quad (3)$$

$$E_{i,j} = \frac{P_{i,j,1}E_{i,j,1} + P_{i,j,2}E_{i,j,2} + \dots + P_{i,j,r}E_{i,j,r}}{P_{i,j,1} + P_{i,j,2} + \dots + P_{i,j,r}} \quad (4)$$

$$E_i = \frac{P_{i,1}E_{i,1} + P_{i,2}E_{i,2} + \dots + P_{i,r}E_{i,r}}{P_{i,1} + P_{i,2} + \dots + P_{i,r}} \quad (5)$$

donde E y P son el valor del efecto ambiental y el peso en cada uno de los niveles de la jerarquía respectivamente, $r=1..n$, n cantidad de impactos, $k=1..3$, $i=j=1..2$.

Entonces, el Efecto Ambiental Global, del proyecto sobre el medio Ambiente, sería:

$$E_T = \frac{\sum E_i}{2} \quad (6)$$

3.1.6 Evaluación de Impacto Ambiental Parcial. División del área del proyecto.

Se debe determinar la forma en que se desea hacer la evaluación, teniendo en cuenta la división que se haga del área del proyecto en subáreas más pequeñas. El yacimiento minero de Punta Gorda esta dividido en 87 bloques, cada uno de estos esta dividido en 9 zonas y cada una de estas zonas en 9 pozos. La estructura jerárquica en nuestro caso sería como sigue:

- Área del Proyecto
 - Bloques
 - Zonas
 - Pozos

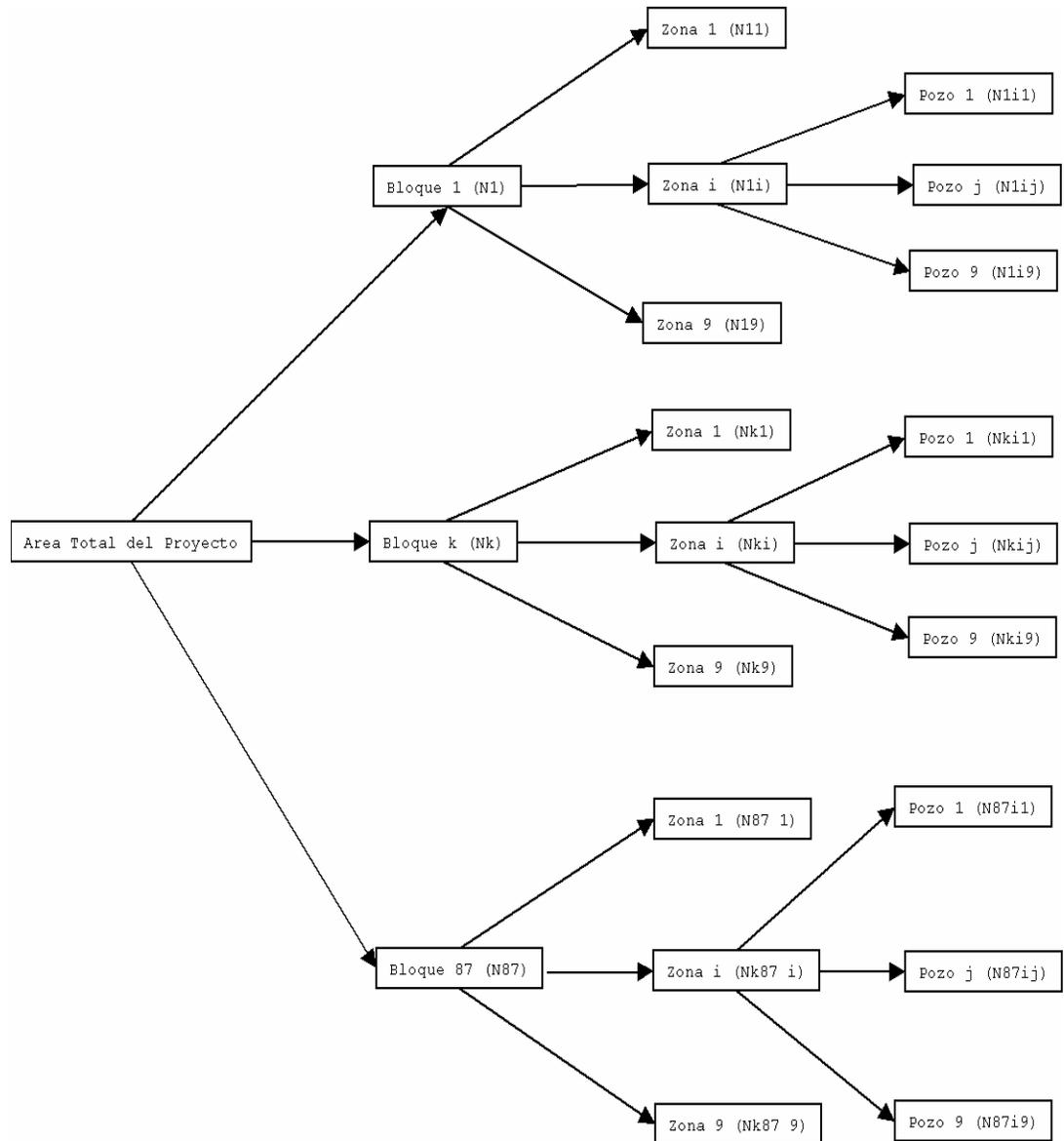


Figura 3.2: Jerarquía de las áreas del proyecto

Evaluación de Impacto Ambiental por zonas. Agregación de Efectos Ambientales a partir de las áreas.

Cada una de las subáreas del proyecto es evaluada siguiendo los pasos anteriores de la metodología. Si en este caso se realiza la evaluación de impacto ambiental, o lo que es lo mismo, el cálculo del efecto ambiental del proyecto, a partir de cada una de sus áreas, para cada uno de sus niveles de forma similar a la EIA global los cálculos se

obtendrían a partir de las siguientes fórmulas:

$$E_{NK,i} = \frac{\sum_{j=1}^p E_{NK,i,j}}{p} \quad (7)$$

$$E_{NK} = \frac{\sum_{j=1}^q E_{NK,i}}{q} \quad (8)$$

$$E_T = \frac{\sum_{j=1}^m E_{NK}}{m} \quad (9)$$

siendo p la cantidad de pozos, q cantidad de zonas y m cantidad de bloques en que esta dividido el proyecto respectivamente. En nuestro caso, p=q=9 y m=87, si tenemos en cuenta la evaluación de todas las zonas que conforman el proyecto, no tiene que ser exactamente así.

3.1.7 Evaluación de Impacto Ambiental Temporal

En la metodología se incluye la posibilidad de realizar las evaluaciones de impacto de forma tal que puedan ser divididas en años, y se realice una comparación entre unas y otras, y ver como ha ido influyendo a lo largo del tiempo de forma negativa o positiva el proyecto sobre el Medio Ambiente. Se determinan los factores ambientales más afectados, los menos afectados, y los que permanecen con el mismo grado de afectación. También las acciones del proyecto que provocan el aumento o la disminución del efecto ambiental de un impacto en particular.

Identificación del período de evaluación.

El proyecto o actividad de la cual se está realizando la EIA puede ser comparado en el transcurso del tiempo, de forma tal que se pueda comparar en varios intervalos de tiempo como se han comportado cada uno de los impactos que provocan las acciones del proyecto sobre los factores ambientales.

Se hace una verificación en la matriz de los valores de la importancia

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

determinando como se han modificado las variables que la determinan, así como para la magnitud. Además de verificar los cambios en los indicadores que determinan la calidad de cada uno de los factores ambientales.

La metodología va a permitir desarrollar comparaciones entre evaluaciones realizadas en distintos periodos de tiempo. A partir de la matriz de efectos ambientales se comparan los efectos ambientales particulares, y se conforma una matriz de comparaciones temporales (MCT):

Factores	Intervalo 1						Intervalo k							
	Acciones						Acciones							
	A ₁ ⁽¹⁾	A ₂ ⁽¹⁾	A ₃ ⁽¹⁾		A _i ⁽¹⁾		Am ⁽¹⁾	A ₁ ^(k)	A ₂ ^(k)	A ₃ ^(k)		A _i ^(k)		Am ^(k)
F ₁	E _{1,1} ⁽¹⁾	E _{1,2} ⁽¹⁾	E _{1,3} ⁽¹⁾		E _{1,i} ⁽¹⁾		E _{1,m} ⁽¹⁾	E _{1,1} ^(k)	E _{1,2} ^(k)	E _{1,3} ^(k)		E _{1,i} ^(k)		E _{1,m} ^(k)
F ₂	E _{2,1} ⁽¹⁾	E _{2,2} ⁽¹⁾	E _{2,3} ⁽¹⁾		E _{2,i} ⁽¹⁾		E _{2,m} ⁽¹⁾	E _{2,1} ^(k)	E _{2,2} ^(k)	E _{2,3} ^(k)		E _{2,i} ^(k)		E _{2,m} ^(k)
F ₃	E _{3,1} ⁽¹⁾	E _{3,2} ⁽¹⁾	E _{3,3} ⁽¹⁾		E _{3,i} ⁽¹⁾		E _{3,m} ⁽¹⁾	E _{3,1} ^(k)	E _{3,2} ^(k)	E _{3,3} ^(k)		E _{3,i} ^(k)		E _{3,m} ^(k)
F _i	E _{i,1} ⁽¹⁾	E _{i,2} ⁽¹⁾	E _{i,3} ⁽¹⁾		E _{i,j} ⁽¹⁾		E _{i,m} ⁽¹⁾	E _{i,1} ^(k)	E _{i,2} ^(k)	E _{i,3} ^(k)		E _{i,j} ^(k)		E _{i,m} ^(k)
F _n	E _{n,1} ⁽¹⁾	E _{n,2} ⁽¹⁾	E _{n,3} ⁽¹⁾		E _{n,j} ⁽¹⁾		E _{n,m} ⁽¹⁾	E _{n,1} ^(k)	E _{n,2} ^(k)	E _{n,3} ^(k)		E _{n,j} ^(k)		E _{n,m} ^(k)

Tabla 3.3: Matriz de comparaciones temporales.

En cada celda de la matriz se tienen:

- Valores de las variables que intervienen en el calculo de la importancia en ese periodo de tiempo.
- Valor de los indicadores ambientales que determinan la calidad ambiental de cada uno de los factores, que dan como resultado la magnitud del impacto provocado por cada acción sobre cada factor.
- Valor del efecto ambiental del impacto provocado por cada acción sobre cada factor.

Con esta información se puede comparar como ha variado con el transcurso del tiempo el impacto provocado por cada acción sobre cada factor, teniendo en cuenta para esta variación, cada una de las variables que intervienen en el cálculo de la importancia y los indicadores ambientales.

La actividad minera que se ha sometido a evaluación se dividirá por

quinquenios, y a su vez cada uno de los años que conforman el mismo.

3.1.8 Determinar afectaciones de los factores ambientales dado el Efecto Ambiental Global.

Una de las ventajas de nuestro método es que permite diseñar proyectos ambientales, en el sentido de que, partiendo de un valor deseado de Efecto Ambiental Global se puedan obtener los valores posibles a alcanzar por las variables que intervienen en la evaluación de impactos.

Con la información brindada por el experto, el efecto ambiental y pesos de los impactos ambientales, se construye la estructura jerárquica, Figura 3.1, correspondiente al efecto, haciendo un desglose de la misma siguiendo los cálculos:

$$E_T = CB(E_i) \quad (10)$$

$$E_i = CB(E_{ij}) \quad (11)$$

$$E_{ij} = CB(E_{ijk}) \quad (12)$$

$$E_{ijk} = CB(E_{ijk}) \quad (13)$$

$$E_{ijk} = CB(I_{ijk} \times M_{ijk}) \quad (14)$$

$$I_{ijk} = CB(VI) \quad (15)$$

VI (variables de la importancia) son los valores de las variables que intervienen en el cálculo de la importancia, serían los valores de intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, acumulación, efecto, periodicidad, recuperabilidad, etc. CB determina las combinaciones de los valores de estas variables, determinará un posible resultado de la variable, teniendo en cuenta el efecto ambiental deseado.

La magnitud de cada impacto, según la acción que lo provoca, sobre cada factor, se determina según el criterio de los expertos teniendo en cuenta los valores de los

indicadores ambientales.

Al obtener la combinación de valores de cada uno de los Medios del Entorno, refiriéndonos a la jerarquía de efecto ambiental, se determinan los diferentes resultados que pueden ser obtenidos por cada uno de los impactos que conforman el último nivel de la estructura, lo que más adelante en el capítulo denominaremos alternativas.

Con los posibles resultados de efectos ambientales de cada impacto, se obtienen las combinaciones de valores de la importancia y de la magnitud.

Por cada valor de la Importancia del impacto fijado, se obtienen los posibles valores de cada una de las variables que intervienen en el cálculo de la misma.

$$VI = CB(IN, EX, MO, PE, RV, SI, AC, EF, PR, MC) \quad (16)$$

A partir de estos, el experto puede diseñar su proyecto imponiendo sobre el sus criterios, para obtener el valor de Efecto Ambiental deseado. Para lograr este objetivo, se desarrolló un modelo apoyado en técnicas de ayuda a la toma de decisiones, específicamente haciéndose uso del método AHP.

3.2 Modelo de Toma de Decisiones en el Diseño de Proyecto Ambiental.

Cuando diseñamos un proyecto ambiental deseamos conocer el comportamiento de los impactos ambientales que se identifiquen en el mismo, a partir de un valor de efecto ambiental, como planteábamos en el epígrafe anterior. Se debe escoger de todas las posibles respuestas la que sea más adecuada, la que corresponda con los criterios que el experto tiene en cuenta para su selección. Para tomar la decisión de cual de ellas seleccionar, utilizamos el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en ingles). Este método permite visualizar de forma ordenada y jerárquica las preferencias de cada uno de los objetivos involucrados, muestra de forma gráfica y organizada la información relacionada con el problema en cuestión.

3.2.1 Aplicación del AHP al diseño de Proyectos de Evaluación de Impacto Ambiental.

El Proceso Jerárquico Analítico ha sido el método aplicado para realizar el proceso de decisión multicriterio, el cual se ha expuesto en el capítulo 2, utilizando la versión difusa. Siguiendo cada una de sus etapas para el diseño de proyectos ambientales podemos determinar la mejor alternativa de valores de impactos ambientales, que nos permite obtener un determinado valor de efecto ambiental.

Definición de los participantes.

Los participantes del proyecto, que también nos sirvieron de expertos a ser encuestados, fueron escogidos según su experiencia en evaluaciones de impacto ambiental fundamentalmente en la minería, así como mineros que también colaboran en investigaciones desarrolladas acerca de la temática, pertenecientes al CEMA.

De este centro se consideraron 5 expertos que tienen una importante participación en las distintas etapas del proceso, aquí se incluye además los investigadores que colaboran con el centro de investigación.

Esta selección fue realizada en la etapa previa, donde se crearon las bases para la aplicación del método.

Identificación del problema.

El problema al cual le aplicamos el método AHP consiste en la selección y la priorización entre las combinaciones de los valores de impactos ambientales obtenidos según el efecto ambiental global deseado, como parte del diseño de proyectos ambientales. Teniendo en cuenta los criterios determinados por los expertos.

Identificación de los criterios.

La zona industrial de Moa, es uno de los pilares de la economía de Cuba, su nivel de producción es fundamental para el territorio y para el país, mayor aún en momentos en que el precio del mineral que aquí se extrae asciende en el mercado

internacional.

Los recursos minerales son una fuente agotable, por lo que se pretende, una vez terminada la explotación minera en las áreas, lograr un paisaje que se asemeje lo mas posible a las características anteriores al inicio de la explotación minera, intentando lograr con el decursar de los años a una mejor calidad del paisaje. La principal victima, por así llamarle, y el factor afectado de forma mas directa es el suelo, y es muy difícil devolverle sus propiedades una vez llegada la etapa de la rehabilitación minera, por esto es un criterio a tener en cuenta si se desean conocer los valores de las variables ambientales que intervienen en la evaluación.

Indirectamente, sufren efectos por causa de la actividad minera, las personas que participan en el proyecto que se pone en marcha, así como las que forman los grupos poblacionales aledaños a las áreas del proyecto. Este ha sido un elemento que los expertos no han pasado por alto, por lo que ha sido seleccionado por ellos como uno de los criterios a tener en cuenta.

Para continuar con la aplicación del Método AHP a nuestro caso de estudio, la estructura jerárquica desarrollada queda como se muestra en la Figura 3.3:

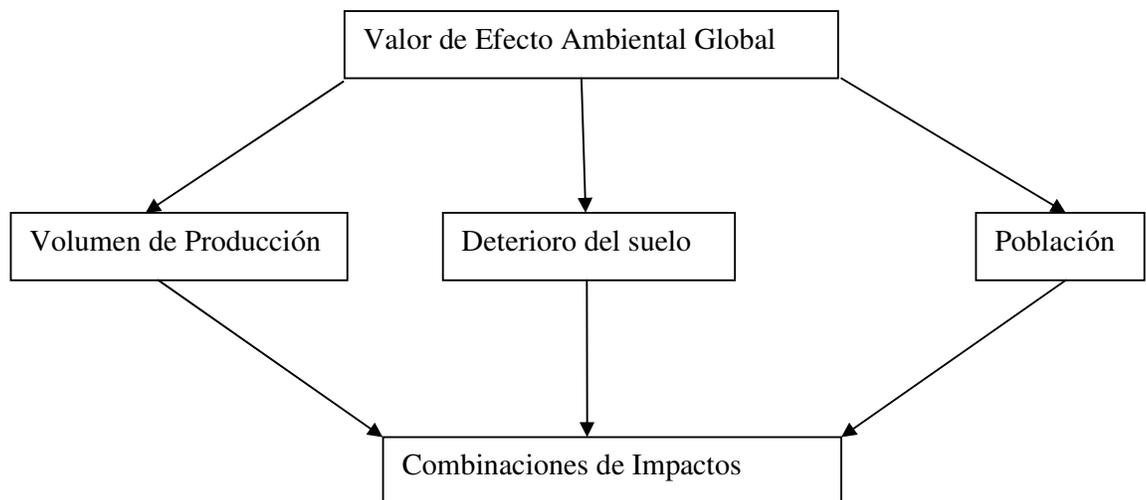


Figura 3.3: Estructura Jerárquica de la aplicación Método AHP

Descripción detallada de los criterios de la Jerarquía.

El primer nivel de la jerarquía corresponde al propósito de la aplicación de la metodología, es decir, encontrar el conjunto de alternativas que permitan obtener el valor de efecto ambiental que se desea, a partir de la combinación de valores de las variables que intervienen en el proceso de evaluación de impacto.

El segundo nivel corresponde a los criterios a tener en cuenta para seleccionar el mejor conjunto de alternativas, seleccionados a partir del consenso de los expertos.

En el último nivel de la estructura jerárquica se ubican las alternativas, que la van a conformar las combinaciones de valores generados a partir del valor de efecto ambiental deseado.

En la Tabla 3.4 se muestra cada uno de los criterios y su descripción según fue concebido por los expertos. En el sistema desarrollado se brindará la posibilidad de tener en cuenta criterios que un experto determinado desee.

Criterios	Descripción
Volumen de Producción	Asigna una distinción a las combinaciones de valores de impactos que conllevan a un aumento de la producción teniendo en cuenta el plan anual del proyecto.
Deterioro del Suelo	Asigna una distinción a las combinaciones de valores de impactos que aumentan la calidad del suelo.
Población	Asigna una distinción a las combinaciones de valores de impactos que disminuyen el número de personas afectadas por el proyecto.

Tabla 3.4: Descripción de los criterios de los expertos.

Descripción detallada de la estructura jerárquica

- **Volumen de Producción:** Con este criterio los expertos tienen en cuenta los aspectos relacionados con el aumento de la producción minera, vinculados al factor económico, dependiendo de los precios en que se encuentre el producto exportable (Níquel) en el mercado internacional. Otros factores a tener en cuenta son el aumento de la extensión del área en explotación, el aumento de las labores mineras, el mayor número de personal contratado para el proyecto y el aumento del número de transportes de mineral a utilizar.
- **Deterioro del suelo:** Los expertos de la zona, basan este criterio en factores como la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, productividad y fertilidad del mismo, destrucción de la red de drenaje original y la deposición de polvo en las aguas.
- **Población:** Con este criterio se tiene en cuenta la afectación tanto del personal que labora en el proyecto, como la población aledaña a la zona de este. En el caso de los trabajadores del mismo se tiene en cuenta fundamentalmente el cumplimiento de la ley de Protección e Higiene del Trabajo, afectaciones de salud de ambos grupos poblacionales y nivel de empleo e inmigración a la zona por causa del proyecto.

Identificación de las alternativas.

Las alternativas en nuestro caso, son las combinaciones de los valores de impactos ambientales que tributan al valor de efecto ambiental global deseado, teniendo en cuenta los criterios seleccionados que establecen prioridades entre las alternativas a ser elegidas.

Para obtener estas alternativas, inicialmente se toma el valor de efecto ambiental que se desea obtener, el cual sería un conjunto difuso asociado a la variable Efecto, y los pesos de cada uno de los nodos de la jerarquía según la opinión de los expertos. Este valor es desfusificado (E_T) y se generan todos los valores que cumplen:

$$E_T \geq \frac{\sum E_i}{2} \quad (17)$$

$$E_i \geq \frac{P_{i,1}E_{i,1} + P_{i,2}E_{i,2} + \dots + P_{i,r}E_{i,r}}{P_{i,1} + P_{i,2} + \dots + P_{i,r}} \quad (18)$$

$$E_{i,j} \geq \frac{P_{i,j,1}E_{i,j,1} + P_{i,j,2}E_{i,j,2} + \dots + P_{i,j,r}E_{i,j,r}}{P_{i,j,1} + P_{i,j,2} + \dots + P_{i,j,r}} \quad (19)$$

$$E_{i,j,k} \geq \frac{P_{i,j,k,1}E_{i,j,k,1} + P_{i,j,k,2}E_{i,j,k,2} + \dots + P_{i,j,k,r}E_{i,j,k,r}}{P_{i,j,k,1} + P_{i,j,k,2} + \dots + P_{i,j,k,r}} \quad (20)$$

Una vez obtenidos los valores que cumplen el sistema de inecuaciones ($E_{i,j,k,r}$), se realiza un proceso de fusificación de estos resultados, obteniéndose finalmente las alternativas, que son el conjunto de valores de efecto ambiental de cada impacto para el valor de E_T deseado.

Supongamos que nuestro problema de toma de decisiones consiste en encontrar la mejor alternativa para lograr un valor de efecto ambiental global Moderado. Los criterios a tener en cuenta son los representados en la estructura jerárquica, Figura 3.3: volumen de producción, deterioro del suelo y población. Se generan un conjunto de más de 10 alternativas, para mayor claridad del ejemplo tomaremos solo 3, Tabla 3.5.

Nuestro objetivo es encontrar la alternativa que nos satisfaga teniendo en cuenta nuestros criterios. Encontraremos la solución haciendo uso del método AHP Difuso, descrito en el Capítulo 2.

Luego de tener construida la estructura jerárquica, Figura 3.3, pasamos a encontrar los pesos de los criterios que se derivan de la matriz de comparación por pares. En este ejemplo tenemos en cuenta que los juicios de comparación de los expertos son representados como números difusos triangulares $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ tal que $l_{ij} > m_{ij} > u_{ij}$.

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Los juicios emitidos por los expertos representados como número difusos se muestran en la Tabla 3.6.

No	Impactos	Valor Impacto
Alternativa 1	Alteración del relieve natural	Moderado
	Incremento de la intensidad de los procesos erosivos.	Moderado
	Pérdida de materia orgánica	Aceptable
	Compactación crítica de los suelos	Aceptable
	Sólidos en suspensión	Aceptable
	Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería.	Aceptable
	Contaminación sónica.	Aceptable
Alternativa 2	Alteración del relieve natural	Aceptable
	Incremento de la intensidad de los procesos erosivos.	Aceptable
	Pérdida de materia orgánica	Aceptable
	Compactación crítica de los suelos	Moderado
	Sólidos en suspensión	Aceptable
	Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería.	Moderado
	Contaminación sónica.	Aceptable
Alternativa 3	Alteración del relieve natural	Moderado
	Incremento de la intensidad de los procesos erosivos.	Aceptable
	Pérdida de materia orgánica	Aceptable
	Compactación crítica de los suelos	Aceptable
	Sólidos en suspensión	Moderado
	Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería.	Aceptable
	Contaminación sónica.	Aceptable

Tabla 3.5: Combinaciones encontradas a partir del efecto deseado (alternativas)

Objetivo	Volumen de Producción	Deterioro del Suelo	Población
Volumen de Producción	1	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)
Deterioro del Suelo	(1/4, 1/3, 1/2)	1	(1/3, 1/2, 1)
Población	(1/3, 1/2, 1)	(1, 2, 3)	1

Tabla 3. 6: Criterios de comparación de los expertos por pares para cada criterio

De la Tabla 3.6 obtenemos que el volumen de producción es el criterio más importante. El cual es alrededor de 3 veces más importante que el deterioro del suelo, y alrededor de 2 veces más importante que la población. La población es alrededor de 2 veces más importante que el deterioro del suelo.

Para obtener los pesos crisp, resolveremos el problema de programación lineal planteado en el capítulo anterior, formado por una ecuación y 6 inecuaciones.

Los pesos obtenidos para el criterio principal son:

$$v_1 = 0.538 \text{ (Volumen de producción)}$$

$$v_2 = 0.170 \text{ (Deterioro del suelo)}$$

$$v_3 = 0.292 \text{ (Población)}$$

Las proporciones de los pesos obtenidos son $\frac{v_1}{v_2} = 3.162$, $\frac{v_1}{v_3} = 1.838$,

$\frac{v_2}{v_3} = 0.581$, por lo que los juicios difusos inicialmente emitidos son aproximadamente satisfechos. Por ejemplo la proporción entre la comparación entre el Volumen de producción y Deterioro del suelo como se muestra en la Tabla 3.6 es alrededor de 3,

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

correspondiendo con el valor de $\frac{v_1}{v_2} = 3.162$. Otra forma de obtener las proporciones de en los juicios de comparación es que $\lambda = \mu_{12} = \mu_{13} = \mu_{23} = 0.838$, por lo que los juicios inicialmente emitidos son satisfechos con la solución.

El valor positivo del índice de consistencia λ indica que los juicios difusos son relativamente consistentes.

Haciendo una comparación por parejas en el próximo nivel de la jerarquía, tendríamos las siguientes tablas:

Volumen de Producción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)
Alternativa 2	(1/4, 1/3, 1/2)	1	(4, 5, 6)
Alternativa 3	(1/8, 1/7, 1/6)	(1/6, 1/5, 1/4)	1

Tabla 3.7: Comparación de alternativas desde el punto de vista del Volumen de Producción.

Deterioro del suelo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	(1/3, 1/2, 1)	(1/5, 1/4, 1/3)
Alternativa 2	(1, 2, 3)	1	(1/3, 1/2, 1)
Alternativa 3	(3, 4, 5)	(1, 2, 3)	1

Tabla 3.8: Comparación de alternativas desde el punto de vista del Deterioro del suelo.

Población	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	(1/5, 1/4, 1/3)	(1/7, 1/6, 1/5)
Alternativa 2	(3, 4, 5)	1	(1/6, 1/5, 1/4)
Alternativa 3	(5, 6, 7)	(4, 5, 6)	1

Tabla 3.9: Comparación de alternativas desde el punto de vista del Población.

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Los valores numéricos mostrados en las tablas anteriores corresponden a los pesos de las alternativas por cada uno de los criterios seleccionados para las comparaciones por pares por los expertos. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.10:

	Pesos de los criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Volumen de Producción	0.538	0.615	0.308	0.077
Deterioro del suelo	0.170	0.143	0.286	0.571
Población	0.292	0.085	0.209	0.706

Tabla 3.10: Resumen de los valores de las alternativas por cada criterio.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 3.10, continuamos con la aplicación del método AHP difuso, donde se suma por cada alternativa, la multiplicación del peso de estas por el peso del criterio principal, las formulas que realizan estos cálculos son:

$$\text{Alternativa 1: } 0.538 * 0.615 + 0.170 * 0.143 + 0.292 * 0.085 = 0.37$$

$$\text{Alternativa 2: } 0.538 * 0.308 + 0.170 * 0.286 + 0.292 * 0.209 = 0.26$$

$$\text{Alternativa 3: } 0.538 * 0.077 + 0.170 * 0.571 + 0.292 * 0.706 = 0.33$$

A partir de aquí podemos concluir que de las tres alternativas a seleccionar para lograr nuestro objetivo, un valor de efecto ambiental global moderado, teniendo en cuenta los criterios emitidos por los expertos, obtenemos que la mejor alternativa es la Alternativa 1.

Aplicando el método AHP difuso, obtenemos además de la alternativa más adecuada para afectar el medio en la menor medida posible, teniendo en cuenta determinados criterios y el valor global deseado, un orden de importancia en el resto de las alternativas.

La Metodología Jerárquico-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental, ha sido desarrollada específicamente para los requerimientos del yacimiento minero de Punta Gorda y según los expertos del centro de estudios que hemos mencionado. Con el objetivo de apoyarlos en sus investigaciones, se ha desarrollado una herramienta inteligente basada en esta metodología, el Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental, que describimos en el Capítulo 4.

Esta metodología la hemos generalizado para que pueda ser empleada en otros tipos de proyectos, lo cual la describimos en el siguiente epígrafe.

3.3 Modelo Genérico de Evaluación de Impacto Ambiental.

Teniendo como base la Metodología Jerárquico-Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental, que ha sido desarrollada para proyectos mineros, específicamente para el yacimiento de Punta Gorda en Moa, Cuba, se ha realizado su generalización, y hemos obtenido un Modelo Genérico de Evaluación de Impacto Ambiental, que puede ser empleado en cualquier tipo de actividad que pueda ser puesta en marcha que requiera del proceso de evaluación de impacto.

El modelo consta de las etapas siguientes:

1. Describir el Medio Ambiente como un conjunto de factores ambientales distribuidos jerárquicamente.
2. Describir la actividad o proyecto que se evalúa como un conjunto de acciones distribuidas jerárquicamente.
3. Identificar los impactos que cada acción tiene sobre cada factor medioambiental.
4. Caracterizar cada impacto mediante la estimación de su importancia.
5. Identificar indicadores ambientales por cada uno de los factores ambientales identificados.
6. Caracterizar cada impacto mediante la estimación de la magnitud, basados en los indicadores identificados.
7. Determinar efecto ambiental individual de cada impacto.

8. Describir el proceso de evaluación de impacto que se va a realizar como un conjunto de entidades distribuidas de forma jerárquica.
9. Analizar el efecto ambiental global del proyecto sobre el medio utilizando para ello los efectos ambientales individuales de cada impacto.
10. Hacer una división de la zona que ocupa el proyecto teniendo en cuenta un determinado criterio, distribuir la subdivisión del área jerárquicamente.
11. Hacer evaluaciones temporales del proyecto.
12. Definir el efecto ambiental global del proyecto para determinar el comportamiento de las variables ambientales durante el desarrollo de la actividad.

Las etapas iniciales, relacionadas con la identificación y caracterización, se realizan de la misma forma que hemos explicado en la metodología jerárquica, así como la determinación del efecto de cada uno de los impactos identificados, mostraremos las diferencias entre el modelo genérico y la metodología jerárquico-matricial difusa.

En el caso de la caracterización del impacto mediante la estimación de la magnitud, cabe destacar, que el encargado de utilizar el modelo debe definir las etiquetas lingüísticas para la variable Efecto Ambiental, y establecer las semejanzas con el resto de las etiquetas de las variables de los indicadores ambientales.

3.3.1 Descripción del proceso de evaluación de impacto como un conjunto de entidades distribuidas de forma jerárquica.

De la misma forma que el entorno ambiental se distribuye de forma jerárquica según los factores ambientales que lo conforman, el proceso de evaluación de impacto que se va a realizar en dependencia del proyecto, debe ser conformado siguiendo una estructura por niveles, en la que el nodo principal sería el efecto ambiental global del proyecto a evaluar, y el último nivel lo conformarían los impactos identificados. Los niveles intermedios corresponden a las entidades que estructuran el proceso de evaluación. En la Figura 3.4 se muestra la descripción anterior:

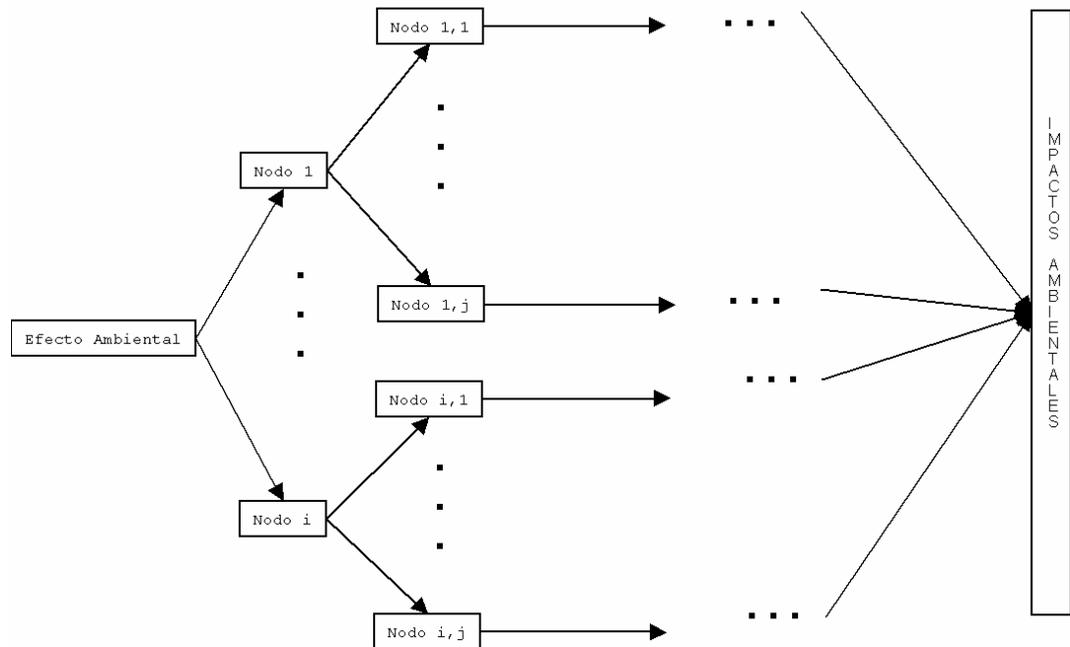


Figura 3.4: Estructura Jerárquica del Efecto Ambiental en el Modelo Genérico.

3.3.2 Determinación del efecto ambiental global del proyecto sobre el medio.

Una vez obtenidos los efectos ambientales de cada uno de los impactos identificados, se necesita conocer como el conjunto de estas afectaciones perjudican al medio ambiente, que en este caso sería la afectación al medio por el proyecto que se esta evaluando, el efecto ambiental global del proyecto. Para esto se realiza un proceso de agregación a través de la estructura jerárquica conformada, cuyos cálculos se realizan como sigue:

$$E_p = \frac{\sum E_{(P+1)}}{\sum peso(P+1)} \quad P = m - 1, \dots, 0 \quad (21)$$

donde E_p es el efecto ambiental del nivel P de la jerarquía de efecto construida, el nivel cero corresponde al efecto global del proyecto y el nivel m es el correspondiente a los impactos ambientales identificados.

3.3.3 Estructuración del área del proyecto jerárquicamente.

El área total del proyecto se divide en subáreas más pequeñas, en caso de que se realice evaluaciones parciales del proyecto respecto a su área. Se debe realizar una estructura jerárquica de estas áreas, en la que el nodo principal de la misma es la total del proyecto y el último nivel la menor división posible, la estructura jerárquica sería:

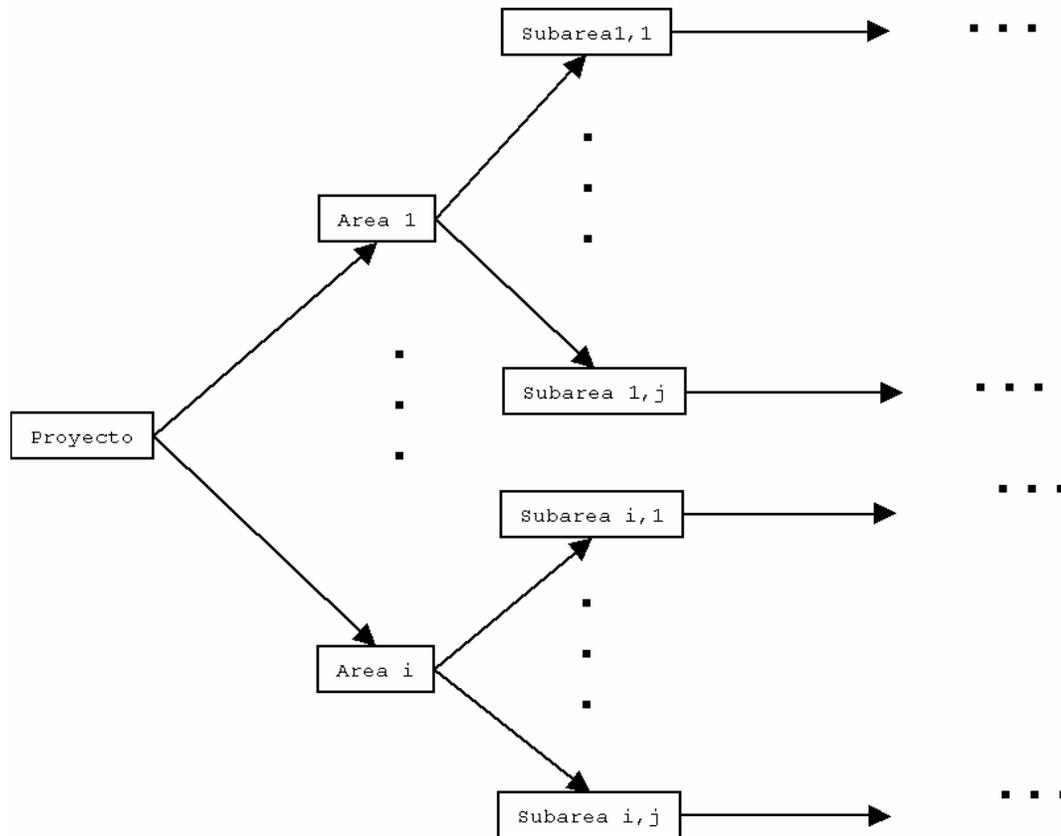


Figura 3.5: Estructura Jerárquica de las áreas del proyecto en el Modelo Genérico.

Para calcular a partir de esta estructura el efecto ambiental global del proyecto, de la misma forma que la etapa anterior, llevando a cabo un proceso de agregación por la estructura, los cálculos se realizan utilizando (21), teniendo en cuenta que EP sería el área total del proyecto.

3.3.4 Evaluación del proyecto teniendo en cuenta aspectos temporales.

Para la realización de esta etapa se determina en el periodo de tiempo para el cual se desea realizar la evaluación, ya sea anual, bianual, por quinquenios, etc.

La matriz que se conforma según el periodo es similar a la que se muestra en la Tabla 3.3.

3.3.5 Determinación del comportamiento de las variables ambientales durante el desarrollo de la actividad.

En esta parte del modelo, se diseñan evaluaciones del proyecto teniendo en cuenta algún valor de efecto ambiental global que se desee obtener y siempre teniendo como base la estructura jerárquica desarrollada que reúne las entidades del proceso de evaluación, los cálculos se realizan según la fórmula:

$$E_p = CB(E_{p+1}) \quad P = 0, \dots, m-1 \quad (22)$$

P es el nivel de la jerarquía en el cual se encuentra realizando el cálculo, E_0 sería el valor de efecto ambiental global dado.

Aplicando la fórmula anterior, se generan varias alternativas que tributan al valor deseado, para seleccionar la mejor, se utiliza el método de decisión multicriterio AHP.

Aplicación del AHP al diseño de Proyectos de Evaluación de Impacto Ambiental.

Como hemos planteado en el epígrafe anterior, donde se expone la metodología jerárquica-matricial completamente, cuando diseñamos proyectos ambientales, y utilizamos el método AHP, debemos definir las personas que serán los encargados de realizar las evaluaciones de las alternativas, los criterios que estas tendrán para seleccionar la mejor alternativa, así como las alternativas posibles y desarrollar una estructura jerárquica del problema de toma de decisiones. Las alternativas se generan a partir de la etapa anterior en el modelo.

Una metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Para determinar la mejor alternativa o el conjunto de estas ordenadas en nivel de importancia, se tendrían todos los valores que cumplan (23).

$$E_p \geq \frac{\sum E_{(P+1)}}{\sum peso(P+1)} \quad P = m-1, \dots, 0 \quad (23)$$

Finalmente con estos resultados, se realiza un proceso similar al seguido en la etapa correspondiente en la metodología jerárquica.

Si el proyecto que se someterá al proyecto de evaluación de impacto ambiental presenta características similares al descrito como caso de estudio en este capítulo, el proceso de evaluación puede ser realizado siguiendo la metodología jerárquico-matricial difusa. En caso de que sea el proceso de evaluación del mismo fácil de jerarquizar, en los aspectos que el modelo genérico planteado en el epígrafe anterior, este puede ser aplicado.

CAPITULO 4. UNA ONTOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. UN SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS MINEROS.

Introducción

Para realizar la evaluación de impacto ambiental, hemos desarrollado un modelo cuya esencia tratamos en el capítulo anterior, el cual surge a partir de las particularidades del centro de investigación encargado de desarrollar las evaluaciones de impacto en el yacimiento minero tomado como caso de estudio. Con el fin de proporcionarles también una herramienta que les facilite la realización del proceso, implementamos un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental en proyectos mineros, cuya base de conocimiento esta estructurada por una ontología desarrollada en nuestra investigación.

En este capítulo mostraremos en un primer epígrafe herramientas inteligentes que cuentan con una base de conocimiento relacionada con la evaluación de impacto ambiental encontradas en diversos trabajos consultados.

En el segundo epígrafe se realiza una descripción de aspectos teóricos de la ontología, relacionado con su concepto, características, clasificación, etc. Las etapas por que pasamos durante el desarrollo de la misma y que se hizo en cada una de ellas, se muestra en el epígrafe 3. Esta ontología para la evaluación de impactos, tiene en cuenta las distintas metodologías de evaluación, tipos de proyectos con sus respectivas acciones y factores, entre otras informaciones, donde se relacionan los conceptos relacionados con la evaluación ambiental. Cuenta con información relacionada con el proceso de evaluación de impacto ambiental, así como especificidades para proyectos de minería, fundamentalmente los aspectos relacionados con la metodología desarrollada.

Finalmente, luego de tener como estará estructurado el conocimiento en nuestro

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

sistema experto, mostramos las particularidades del Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos mineros elaborado en la investigación.

4.1 Una descripción de herramientas inteligentes de evaluación de impacto ambiental.

En la bibliografía revisada encontramos algunas herramientas que han sido desarrolladas para realizar el proceso de evaluación de impacto ambiental. Ninguna de estas ha sido seleccionada como software de apoyo a nuestra problemática debido a que en primer lugar su utilización no es gratuita, lo que implicaría para el centro de investigación al cual pertenecen nuestros expertos, CEMA, un gasto que no pueden asumir. Por otra parte, estos sistemas han sido desarrollados para tipos de proyectos específicos, incluso para metodologías específicas, y su adaptación a nuestro problema también implicaría incurrir en la adquisición no gratuita de la licencia de los mismos. A continuación mencionamos 4 de estos sistemas.

Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental (EEIE). Desarrollado por el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de la Coruña, España.

Este sistema implementa las metodologías de evaluación de impacto de Leopold y Batelle-Columbus. Realiza caracterizaciones y evaluaciones de hipótesis asociadas con la EIA. Estas hipótesis son establecidas para enlazar acciones del proyecto con factores ambientales, con el fin de determinar acciones que impliquen la corrección de los efectos al medio. El conjunto de hipótesis son obtenidas por una red neuronal artificial de backpropagation y el EEIE evalúa cada una de las hipótesis.

La evaluación de impacto ambiental determina la aceptación, modificación o revocación de un proyecto a evaluar. El objetivo principal de EEIE es la predicción de numerosos eventos e hipótesis que pueden contener incertidumbre. Se hace necesario un proceso de simulación y repetición de la evaluación de impacto usando ciclos de trabajo. En cada caso esto puede entenderse como razonamiento no monotónico, donde nuevos eventos pueden modificar razonamientos previos. Por ejemplo, acciones de

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

corrección pueden modificar el enlace de asociación entre acciones del proyecto y factores afectados.

La principal variable de EEIE es la evaluación del impacto ambiental. Se establecen 3 objetivos principales:

- Propuestas de planificación de proyectos y sus opciones considerando el impacto producido en los factores ambientales.
- Establecer acciones correctoras para disminuir los impactos al medio ambiente.
- Decidir sobre la ubicación del proyecto de la mejor forma posible.

Sistema Experto para EIA-Método (EIA-System). Desarrollado por el Departamento de Ciencias de la Información de la Universidad de Uppsala, Suecia.

El EIA-system contiene conocimiento que permite aconsejar a sus usuarios sobre proyectos de desarrollo de hidroeléctricas y regulaciones de los ríos donde estas están implantadas, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona. Está basado en un método empleado para la evaluación de impactos que provoca este tipo de proyectos sobre el medio, llamado Evaluación de Impacto Ambiental-Método. Además brinda asistencia en la toma de decisiones.

Las respuestas que emite el sistema a partir del razonamiento sobre su base de conocimiento es en primer lugar, las consecuencias que provoca el desarrollo de proyectos de hidroeléctricas y regulaciones en ríos sobre el medio ambiente además de las consecuencias que este tendrá sobre las consideraciones del proyecto.

EIA-system puede manipular, en cuanto a las regulaciones de los ríos, no solo el clima para los países para lo cual ha sido desarrollado, sino también para áreas polares, tropical húmedo, etc. Su objetivo es generar aspectos fundamentales del área específica seleccionada por usuario.

En resumen este sistema tiene como propósito, advertir de que la instalación de una hidroeléctrica con las características del río donde se implantara es viable, teniendo

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

en cuenta las condiciones climáticas de la región, así como las afectaciones ambientales que esto puede acarrear.

Sistemas Experto con Base de Datos para la Evaluación de Impacto Ambiental (EDEIA). Desarrollado por la Facultad de Ciencias y Estudios Ambientales de la Universidad de Putra, Malasia.

EDEIA consiste de un prototipo de sistema experto y una base de datos, que permite manipular reportes relacionados con la evaluación de impacto ambiental.

Los preceptos fundamentales en los que se basa el sistema son:

- Las componentes ambientales y actividades que pueden ser clasificadas.
- La descripción del medio ambiente en clases de componentes similares a las actividades clasificadas.
- Los impactos, medidas de mitigación de estos y los impactos residuales deben ser claramente especificados.

El rol fundamental de EDEIA es asistir a los expertos de las evaluaciones ambientales para producir un reporte ambiental completo y eficiente. Es útil también para predecir impactos ambientales que puede provocar el proyecto.

En la base de datos con la que cuenta el sistema se tiene información relacionada con estudios de medio ambiente que se hallan desarrollado, tales como la descripciones de proyectos, impactos potenciales de estos, medidas de mitigación e impactos residuales. EDEIA produce un conjunto de reglas que le permiten conocer de la existencia de clases de componentes ambientales, y tipos de proyectos.

El sistema tiene como propósitos:

1. Proveer de un prototipo para manipular información compartida.
2. Asistir a los expertos en EIA a preparar reportes relacionados con la evaluación de impacto.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

3. Colaborar en la predicción de impactos ambientales potenciales.
4. Asistir a las compañías encargadas de las evaluaciones en la preparación de un completo y eficiente informe de EIA en corto tiempo.

Sistema Experto basado en el conocimiento para Evaluación de Impacto Ambiental usando pizarra. (JESEIA). Desarrollado por Facultad de Ingeniería, Universidad de Putra, Malasia.

Los resultados de la EIA pueden ser utilizados en la planificación e implementación de proyectos. Los informes de evaluaciones de impacto describen categorías de actividades relacionadas con diversos tipos de proyectos, se organiza toda la información y se obtiene un reporte completo relacionado por capítulos, en dependencia de los tipos de proyectos, acciones que estos provocan, etc.

El Departamento de Medio Ambiente de Malasia (DOE) encuentra una problemática en la evaluación (para aprobar, rechazar, o aprobar con restricciones) de reportes de EIA. Si un reporte es aprobado el DOE presenta dificultades al verificar si un desarrollador de proyectos esta actualmente cumpliendo con las reglas aprobadas.

Basados en esto surge JESEIA, que es un sistema inteligente que prepara reportes de EIA apoyando a la toma de decisiones en cuanto a la aprobación del proyecto.

Este sistema es desarrollado específicamente para la entidad legislativa encargada de aprobar la ejecución de los proyectos basados en los reportes de evaluación de impacto ambiental.

4.2 Concepto de ontología y características

El término *ontología* procede de la Filosofía, en donde se define como "el estudio del ente en cuanto a tal" [14]. Por ello es llamada la teoría del ser, es decir, el estudio de las cosas: qué es, cómo es y cómo es posible. Así, la Ontología como ciencia se ocupa de establecer las categorías fundamentales o modos generales de ser de las cosas.

En el ámbito de la Ingeniería del Conocimiento el concepto ha ido variando a lo largo del tiempo, dependiendo del uso en cada momento. En general, el término ontología hace referencia al intento de formular un exhaustivo y riguroso esquema conceptual dentro de un dominio dado, con la finalidad de facilitar la comunicación y la compartición de la información entre diferentes sistemas.

La definición más aceptada de ontología es la propuesta por Gruber [25], (y ampliada por Studer [53]) que establece que una ontología es "una especificación explícita y formal sobre una conceptualización compartida". El significado de esta definición es que las ontologías definen conceptos y relaciones presentes en algún dominio de una forma consensuada y accesible, a la vez que esta descripción se hace de manera formal para que pueda ser procesada por un ordenador.

Actualmente se utilizan ontologías para representar el conocimiento en el que se apoya una amplia variedad de aplicaciones. La razón del éxito de las ontologías es que permiten recoger la semántica de un dominio para razonar sobre él al tiempo que promueven la interrelación con otras ontologías. De esta forma el conocimiento adquirido puede ser compartido y reutilizado por varias aplicaciones, lo que redundará en un menor coste humano y computacional en el desarrollo de aplicaciones inteligentes.

Una ontología consta de los siguientes elementos [52]:

- **Conceptos.** Los conceptos o clases son las ideas básicas que se pretenden formalizar. Una clase puede tener subclases que especialicen el concepto al que se refiere.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

- **Relaciones.** Las relaciones, roles o *slots* representan las conexiones entre los conceptos. Entre las relaciones tenemos aquellas que se refieren a la taxonomía del dominio, como por ejemplo las del tipo *subclase-de*, *parte-de*, etc.
- **Individuos.** Los individuos o instancias de la ontología son los hechos concretos de un concepto. Cada individuo es, por tanto, instancia de una o más clases.
- **Restricciones.** En la ontología se establecen restricciones, axiomas o *facets* sobre las relaciones, que determinan el tipo y la forma en que los elementos de la ontología pueden conectarse.

En términos prácticos, desarrollar una ontología consiste básicamente en definir las clases que formarán la ontología, organizar estas clases en una jerarquía taxonómica, asignar relaciones y definir los valores permitidos para estas propiedades y rellenar los valores de instancias y propiedades.

La posibilidad de compartir la estructura del conocimiento representado es uno de los principales objetivos en el desarrollo de ontologías.

La reutilización es otro de los valores fundamentales de las ontologías, ya que permite ahorrar esfuerzo en la adquisición y codificación del conocimiento. Así, para construir una ontología de un tamaño considerable se pueden integrar varias ontologías existentes que describan partes menores del dominio. Y al contrario, también es posible tomar una ontología más general y especializarla para describir la parte del dominio que más nos interese.

Una vez construida la ontología dispondremos de una especificación del dominio estudiado.

Dado que esta descripción tendrá un carácter formal, se podrá *analizar* el conocimiento reflejado para validarlo y verificarlo manual y automáticamente, de manera que pase a formar parte de un repositorio que pueda utilizarse con toda confianza.

4.2.1 Tipo de Ontologías

Las ontologías pueden variar tanto en su contenido como en su estructura y su implementación.

Podemos caracterizar el tipo de una ontología según varios criterios [18]:

Nivel de descripción

La construcción de una ontología es diferente según el grado de precisión del conocimiento que se desea que refleje. Puede que lo que se necesite sea simplemente un conjunto de términos que definan un vocabulario, o que este léxico se organice en categorías para formar un tesoro más complejo. En el otro extremo encontramos ontologías completas donde los conceptos se conectan mediante relaciones con una semántica bien definida, representando con mucho detalle el dominio de conocimiento.

Dominio conceptual

Las ontologías también difieren según el propósito para el que fueron construidas. La principal distinción se establece entre ontologías de bajo nivel que describen dominios muy específicos, como por ejemplo las ciencias ambientales, y otras de más alto nivel en las que se describen los conceptos básicos y las relaciones que participarán en cualquier dominio cuando se exprese mediante lenguaje natural.

Instancias

Como señalábamos anteriormente, toda ontología diferencia entre los conceptos utilizados en la representación y los individuos que hacen efectivas estas descripciones. Esta segunda parte puede separarse de la definición de clase e implementarse aparte en una base de conocimiento. En cualquier caso, siempre aparecerá la dificultad de decidir durante el proceso de desarrollo si un objeto del dominio debe representarse como concepto o como individuo; la respuesta a esta cuestión variará según el objetivo de la ontología.

Lenguaje de especificación

Una vez descritos los elementos que forman parte de una ontología será necesario almacenar estas definiciones utilizando un lenguaje de representación.

4.2.2 Desarrollo de una ontología

Existen diversas metodologías para la implementación de ontologías.

- Metodología Cyc
- Metodología Uschold and King
- Methontology
- Refseno

En nuestro trabajo vamos a emplear la metodología Methontology, desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid.

Los pasos no secuenciales de esta metodología son:

- **Especificación** de la meta, el alcance y la granularidad de la ontología.
- **Conceptualización** ayuda a organizar y estructurar el conocimiento adquirido (modelo conceptual) usando lenguajes de representación (tablas, UML, jerarquías, etc.) independientes de los lenguajes de implementación.
- **Implementación** Consiste en formalizar e implementar el modelo conceptual en lenguajes formales (Ontolingua, RDF/S, OWL, LPO, etc.)
- **Evaluación.**

Estos pasos se implementan por fases del siguiente modo:

Fase 1: Determinar el alcance de la ontología

El primer paso que debe realizarse en el desarrollo de una ontología debe ser delimitar el dominio que tratará y su alcance. Para ello, debemos responder a las

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

siguientes cuestiones:

1. ¿Cuál es el dominio que representará la ontología?
2. ¿Para qué va a utilizarse la ontología?
3. ¿A qué preguntas deberá responder la ontología?
4. ¿Quién utilizará y mantendrá la ontología?

La respuesta a estas preguntas puede cambiar durante el proceso de desarrollo, pero debe tenerse siempre en cuenta para ayudar a determinar el ámbito del modelo.

Preguntas de competencia

Una de las formas de determinar el ámbito de una ontología consiste en esbozar una lista de preguntas que la ontología debe ser capaz de contestar, lo que se llaman preguntas de competencia. Estas preguntas establecerán el límite de lo que debe representarse, de forma que la ontología contenga suficiente información y el nivel de detalle adecuado para responder a estas preguntas. Las preguntas de competencia no tienen por qué ser exhaustivas, basta con que sean un bosquejo de lo que se pretende obtener con la ontología.

Fase 2: Enumerar los términos importantes de la ontología

En el desarrollo de la ontología se deben identificar los conceptos fundamentales que intervienen en el dominio del problema, aquellos términos que son interesantes y sobre los que se quiere hablar, de esta forma se puede perfilar que propiedades tienen esos términos y que se quiere saber de ellos. El objetivo que persigue esta fase no es de ser muy exhaustivos, pues solo se pretende identificar los elementos principales del ámbito de la ontología. Se desarrolla una jerarquía de conceptos y se definen las propiedades de estos.

Fase 3: Definir las clases y la jerarquía de clases

Existen varias aproximaciones a la construcción de la jerarquía de clases en una ontología:

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

- Un enfoque de arriba a abajo (top-down) comienza definiendo en primer lugar los conceptos más generales y posteriormente especializando estas definiciones.
- El enfoque de abajo a arriba (bottom-up) es contrario al anterior y comienza definiendo las clases más específicas (las hojas de la jerarquía), que después agrupa para formar clases más generales.
- Es posible utilizar un enfoque intermedio, de forma que primero se definen las clases que se corresponden con los principales conceptos identificados en el dominio y, a continuación, se generalizan y especializan estos conceptos hasta donde sea necesario.

Ninguno de los tres enfoques proporciona ventajas sobre los otros en cualquier situación, así que se deberá utilizar aquel que el diseñador considere más aproximado a su visión del dominio del conocimiento. Habitualmente se utiliza un enfoque combinado, puesto que los conceptos más descriptivos suelen situarse en medio de la jerarquía.

Fase 4: Definir las propiedades de las clases

Una vez definidas las clases principales de la ontología, a partir de ahí, se definirán las propiedades que se consideran deban tener estas clases. En la definición de estas relaciones, aparecen y cobran importancia conceptos, que no han sido incluidos en la jerarquía de clases inicial, que serán añadidos. Describas las relaciones principales se detallarán las clases secundarias que se han añadido, su jerarquía y sus relaciones, repitiéndose el proceso hasta que se haya reflejado el conocimiento necesario para satisfacer las preguntas de competencia elaboradas en la primera fase del desarrollo.

Las propiedades de las clases de una ontología se suelen dividir en varios tipos; esta distinción es útil cuando nos preguntamos qué características debemos representar de cada concepto:

Propiedades intrínsecas, ligadas íntimamente al concepto.

Propiedades extrínsecas, asignadas externamente.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Partes, cuando el objeto está estructurado; puede referirse a partes físicas o abstractas **Relaciones con otros individuos**.

Fase 5: Definir las restricciones de las propiedades

Una vez definidas algunas propiedades, es necesario asociar a cada una de ellas ciertas restricciones que determinen el tipo de valores que la propiedad puede tomar.

La primera restricción que debe asignarse es el dominio y el rango de una propiedad, o en su defecto el tipo de dato sobre el que se aplica. El dominio de una propiedad se refiere a las clases a las que puede aplicarse, mientras que el recorrido es el tipo de dato, clase o conjunto de clases que puede asignarse a la propiedad.

4.3 Una ontología de Evaluación de Impacto Ambiental

La ontología que hemos desarrollado en nuestra investigación, reúne los aspectos generales del proceso de evaluación de impacto ambiental, además de cuestiones particulares relacionadas con la metodología jerárquica, y con el caso de estudio seleccionado.

Siguiendo las fases de la metodología Methontology, a continuación mostramos nuestro proceso de desarrollo.

Fase 1: Determinar el alcance de la ontología

La ontología desarrollada tiene como objetivo representar conocimiento relacionado con el proceso de evaluación de impacto ambiental; tipos de proyectos a los que una vez que se decida poner en marcha debe realizárseles la evaluación de impacto ambiental; qué metodologías de evaluación de impactos pueden ser empleadas para desarrollar el proceso de evaluación; los factores ambientales que pueden ser afectados por cada tipo de proyectos y que acciones de estos los afectan; y los impactos y afectaciones que provocan las actividades del proyecto. De forma general, valorar cada impacto que provoca el proyecto en cuanto a su importancia y magnitud, así como una valoración global del efecto del proyecto al medio. La ontología se aplica como

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

estructura de la base de conocimiento del Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental que se describe más adelante.

En nuestro caso, las siguientes cuestiones servirían como preguntas de competencia:

1. ¿Cuál es el efecto ambiental global del proyecto?
2. ¿Cuáles son las acciones del proyecto?
3. ¿Cuáles son los factores del medio afectados?
4. ¿Qué impactos provoca el proyecto?
5. ¿Cuál es la importancia de cada impacto del proyecto?
6. ¿Cuál es la magnitud de cada impacto del proyecto?
7. ¿Qué valores tienen las variables que intervienen en el cálculo de la importancia para cada impacto que provoca el proyecto?
8. ¿Qué valores toman los indicadores ambientales para cada uno de los factores ambientales?
9. ¿Qué metodología puedo emplear para realizar el proceso de evaluación de impacto?
10. ¿Qué tipos de proyectos requieren se le realice el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental?
11. ¿A qué áreas del proyecto se le realizará la evaluación?

Fase 2: Enumerar los términos importantes de la ontología

En la ontología de Evaluación de Impacto Ambiental, el elemento de información principal es el Efecto Ambiental. Este efecto puede ser provocado sobre el medio ambiente (Efecto Ecológico) o a personas (Efecto Humanos). Los primeros engloban a los impactos y las afectaciones ambientales y los segundos a los efectos causados a las personas que intervienen en el proyecto y a las personas de las áreas aledañas al proyecto.

Otros elementos que intervienen en la ontología son los relacionados con las acciones del proyecto y los factores que afecta distribuido jerárquicamente, así como los

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

proyectos que requieren la evaluación de impactos y las metodologías para desarrollarlas. Además todo lo relacionado con los indicadores ambientales.

Términos de la Ontología

1. Efecto Ambiental
2. Efecto Ecológico
3. Efecto Humanos
4. Personas aledañas al proyecto
5. Personas del proyecto
6. Proyecto
7. Impacto Ambiental
8. Afectación Ambiental
9. Acción del Proyecto
10. Factor Ambiental
11. Indicador Ambiental

Fase 3: Definir las clases y la jerarquía de clases

Una vez que hemos seleccionado los términos importantes en la ontología, pasamos a formalizarlos en clases y conformar una jerarquía, según las relaciones que existan entre ellos.

La aproximación utilizada a la construcción de la ontología ha sido la intermedia. Se define en primer lugar la clase Efecto Ambiental, de la que Ecológico y Humanos son subclases, a su vez estas son superclases de Impactos y Afectaciones, y de Personas del proyecto y Personas aledañas al Proyecto, respectivamente.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

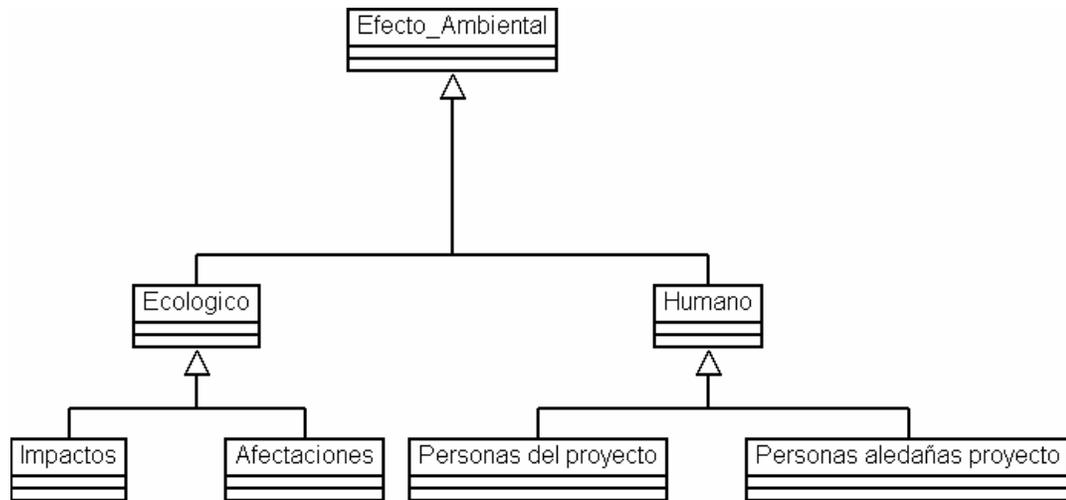


Figura 4.1: Jerarquía de Clases preliminar

Esta jerarquía de clases preliminar mostrada en la Figura 4.1 es simple, solo refleja una parte de la información que contendrá la ontología. Luego de definidas estas clases se definirán las propiedades de estas y se crearán nuevas clases, de ser necesario.

Fase 4: Definir las propiedades de las clases

Para reflejar el conocimiento de la ontología, será necesario asociar a cada impacto y afectación información relacionada con los efectos que este provoca, teniendo en cuenta su importancia y su magnitud. Basados en el principio de la herencia, se le asignan las propiedades relacionadas con los efectos provocados a la clase Efecto_Ambiental, donde las subclases de esta superclase heredan sus propiedades.

Propiedades de la clase Efecto_Ambiental	Descripción
Afecta_a	Que factor ambiental es el afectado
Imp	Valor de la importancia de ese efecto
Mag	Valor de la magnitud de ese efecto
Valor	Valor del efecto ambiental
Provocado_por	Acción que provoca el efecto ambiental
Tipo_Proyecto	Tipo de proyecto que provoca ese efecto ambiental.

Tabla 4.1: Propiedades de la clase Efecto_Ambiental

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

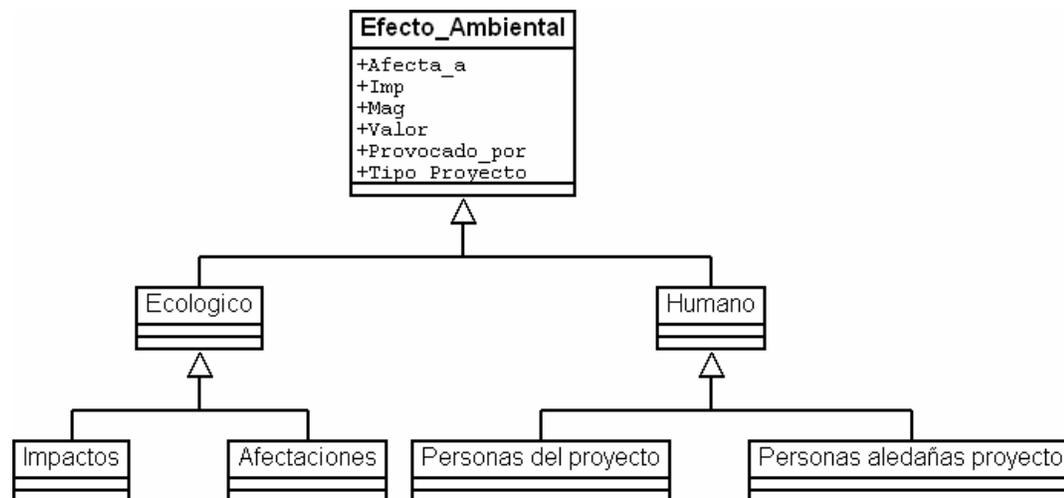


Figura 4.2: Jerarquía de clases preliminar incluidas las propiedades

Un término importante en el dominio del problema de evaluación de impacto ambiental, es factor ambiental, que también cuentan con una estructura jerárquica definida. Los factores ambientales se dividen en 2 categorías, los que pertenecen al Medio Físico y los que pertenecen al Medio Socio Económico. El primero se subdivide en Medio Biótico, Medio Inerte y Medio Antrópico, el segundo en Medio Sociocultural y Medio Económico. La propiedad que define a estas clases es el Nombre.

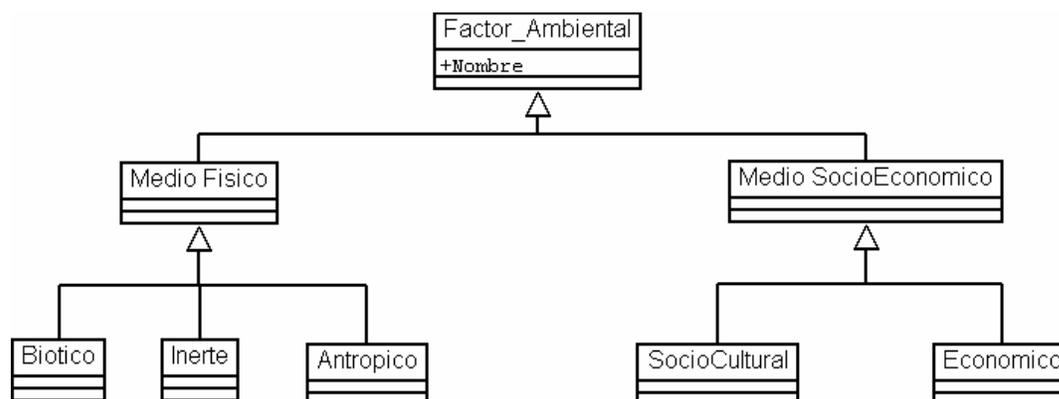


Figura 4.3: Jerarquía de Factores Ambientales.

Las acciones del proyecto o actividad que se pone en marcha, causantes de los impactos y afectaciones ambientales al medio ambiente, también forman una estructura jerárquica. El conjunto de las acciones del proyecto que se pondrá en marcha constituyen las actividades de este, así como estas en su totalidad forman las situaciones

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

que agrupadas determinan la actuación del proyecto al entorno. Las propiedades de la clase Actuación_sobre_Entorno, son la descripción de la actividad en cuestión y el nombre de esta.

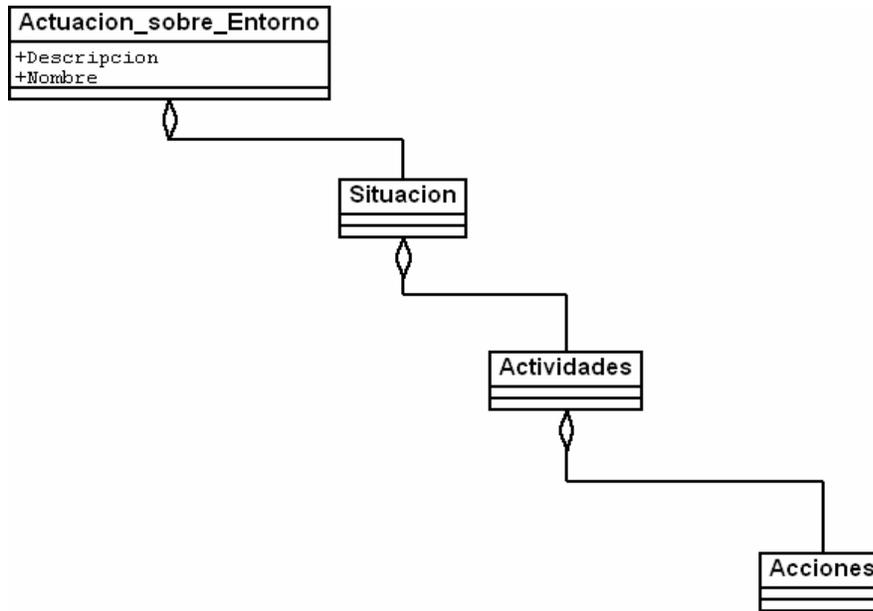


Figura 4.4: Jerarquía de Actuación sobre el entorno del proyecto.

Las metodologías que se emplean para desarrollar el proceso de evaluación de impacto ambiental, han sido clasificadas en la literatura basándose en diversos criterios, como vimos en capítulos anteriores, en la ontología desarrollada, se dividen en Metodologías Matriciales y Metodología no Matriciales, por ser de nuestro interés que el conocimiento sea reflejado de esa forma. No aparecen reflejadas todas las metodologías mencionadas anteriormente, sino las mas empleadas, según expertos, y la desarrollada en esta investigación. La clase Metodologías cuenta con las propiedades descripción, que define una reseña de dicha metodología y el nombre de la misma.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

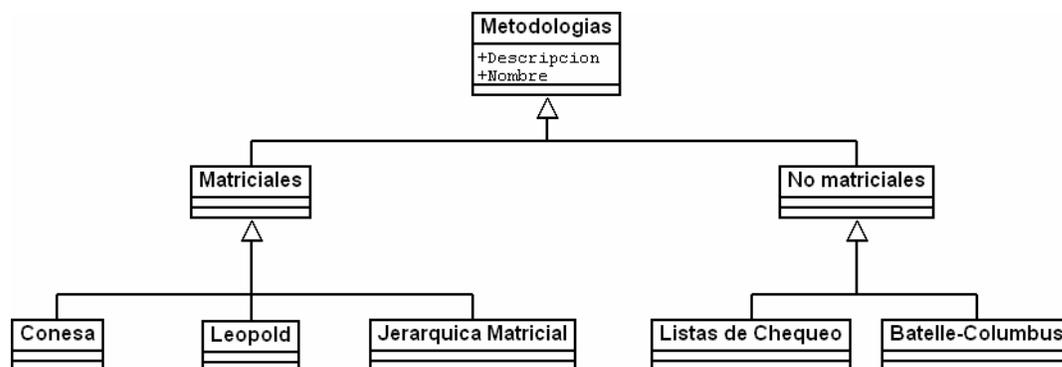


Figura 4.5: Jerarquía de las Metodologías para la EIA

El sistema legislativo de cada país, exige a los proyectos que se pongan en marcha, para ser aprobada a no su ejecución, se realice el proceso de EIA, en la ontología, se recoge conocimiento relacionado con los tipos de proyectos que requieren de la evaluación. En la Figura 4.5 se muestra una porción de la estructura jerárquica, la ontología en su totalidad puede verse en el Anexo A5. Las propiedades que distinguen a cada proyecto y por lo que son asignadas a la clase Tipo_Proyecto son la descripción del proyecto en cuestión y su nombre.

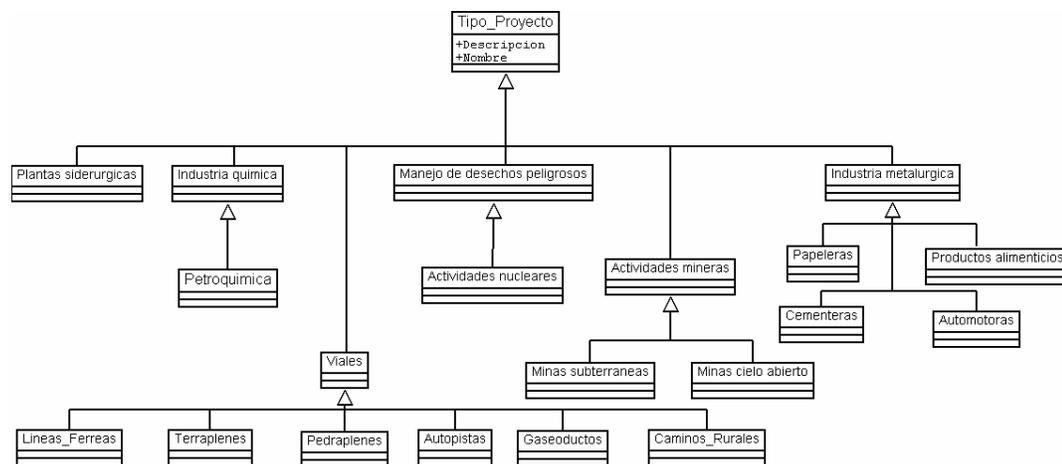


Figura 4.6: Tipos de Proyectos para realizar el proceso de EIA

Uno de los objetivos que tiene la investigación desarrollada es precisamente, que los proyectos ambientales puedan ser divididos en áreas para su evaluación. La ontología de EIA, tiene información relacionada con esto, para proyectos de minería a cielo abierto, y que forma parte de la Metodología Jerárquica que se desarrolló. Estas clases surgieron después de haberse definido los términos de la ontología. Las áreas del

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

proyecto tienen como propiedades su descripción y su nombre.

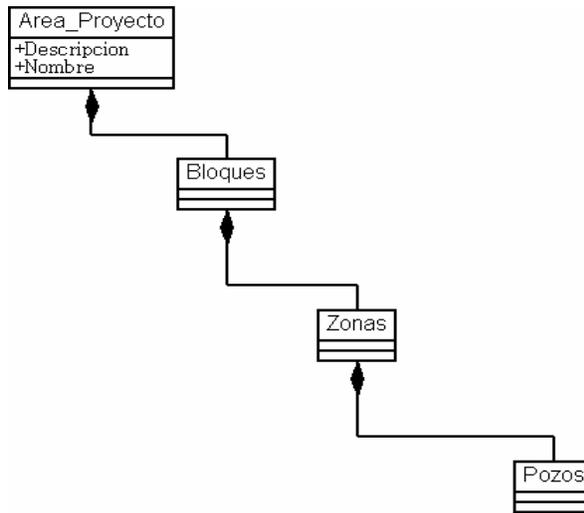


Figura 4.7: Estructura de las áreas de proyecto de minería a cielo abierto

Otros conceptos que guardan relación con el Efecto Ambiental son el de Importancia y el de Magnitud, se identificaron 2 clases una para cada uno de ellos. El concepto Magnitud lleva asociado a Indicadores Ambientales.

En acápites anteriores abordamos como para el cálculo de la importancia de un impacto ambiental, se deben tener en cuenta determinadas variables que nos sirven para valorar el impacto ambiental, para luego calcular su importancia, estas variables son en la ontología, las propiedades definidas para la clase Importancia, conjuntamente con su valor.



Figura 4.8: Clase Importancia y sus propiedades

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

La clase Magnitud que tiene como propiedad su valor, tiene asociada la clase Indicadores, con las propiedades del valor máximo permisible que puede alcanzar el indicador según las normas internacionales, a que Factor mide la calidad ambiental, así como el valor que toma en la medición o valoración el indicador.

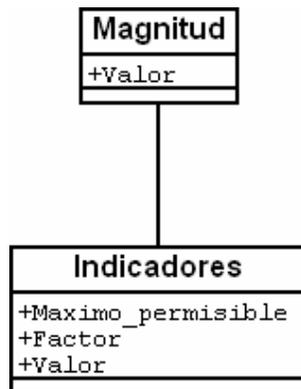


Figura 4.9: Clases Magnitud e Indicadores

El diseño de la jerarquía de clases en su totalidad se muestra en el Anexo A5.

Fase 5: Definir las restricciones de las propiedades

A las propiedades identificadas para cada una de las clases (slots) se le deben asignar determinadas restricciones (facets), definiremos para cada una de ellas el dominio y el rango.

El dominio de las propiedades relacionadas con el efecto ambiental es la clase Efecto_Ambiental. En la Tabla 4.2 mostramos el rango de cada una de sus propiedades.

La propiedad máximo_permisible de la clase Indicadores almacena información de tipo numérica, así como Valor una cadena de caracteres. En el caso de Factor, su rango viene dado por instancias de la clase Factor Ambiental.

Las propiedades del resto de las clases de la ontología guardan información de tipo cadena de caracteres.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Propiedades de Efecto_Ambiental	Rango
Afecta_a	Instancia de la clase Factor_Ambiental
Imp	Instancia de la clase Importancia
Mag	Instancia de la clase Magnitud
Valor	Cadena de caracteres
Provocado _ por	Instancia de la clase Acciones
tipo _ proyecto	Instancia de la clase Tipo _ proyecto

Tabla 4.2: Propiedades de la clase Efecto_Ambiental

4.4 Utilización de la ontología desarrollada

El conocimiento representado en la ontología desarrollada en esta investigación, específicamente el que describe los aspectos particulares para proyectos de minería implementado en la metodología jerárquica, es el que ha servido para estructurar la base de conocimiento del Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros. Sus funcionalidades están estrechamente relacionadas con la evaluación de impacto para actividades relacionadas con la minería a cielo abierto.

Esta ontología fue diseñada utilizando como herramienta el Protege 2.0, el cual provee rudimentos para generación de código en lenguaje CLIPS, empleado para implementar el prototipo desarrollado.

4.4.1 Prototipo de Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental

En los capítulos anteriores se ha abordado sobre la importancia de la protección del medio ambiente, principalmente de la necesidad de realizar la Evaluación de Impacto Ambiental, para proyectos que se pondrán en marcha. Durante la realización de este proceso, se requiere de recopilar información ambiental de la zona donde se encuentra el proyecto, es complejo y extenso para las personas en él implicadas. Esto hace necesario que se empleen herramientas que faciliten la realización de la evaluación.

Estas herramientas pueden hacer uso de la Inteligencia Artificial,

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

específicamente Sistemas basados en el Conocimiento, que permitan manipular la información que generará el proceso de evaluación de impactos. El criterio con que son evaluados los impactos ambientales es subjetivo, esto repercute en el entendimiento de los resultados de la evaluación para personas ajenas a la realización del proceso ambiental del proyecto.

El hecho de emplear un sistema basado en el conocimiento (Sistema Experto) por sus características, nos permite saber las causas por las que se determinó un valor específico en la valoración de impactos, el valor de la importancia, la magnitud o el efecto ambiental, ya sean parciales o globales del proyecto (importancia y efecto). Además conocer lo relacionado con los resultados de los indicadores ambientales, y de la opinión de los expertos en cada uno de los factores ambientales identificados.

Lo que hace a la herramienta desarrollada verdaderamente útil para las personas encargadas de desarrollar la evaluación, es una interfaz amigable, fácil de usar y de comprender, con menú y botones simples, que no hagan el trabajo demasiado engorroso, ni necesiten para utilizarlas un curso de capacitación demasiado extenso.

Anteriormente tratamos cómo se implementó la Metodología Jerárquico Matricial Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental. Vimos además que la información que se manipula en estos casos es de tipo lingüística en su mayoría, por lo que el sistema debe ser capaz de manipular tanto información numérica como lingüística, según el conocimiento con el que cuenta.

Para la construcción del Prototipo se pasaron por las siguientes etapas:

- Base de conocimientos (BC).
- Interfaz de Fusificación.
- Subsistema de explicación.
- Interfaz de defusificación
- Interfaz de usuario.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Implementación de la Base de Conocimiento.

El problema a resolver por el Sistema Experto desarrollado es el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, empleando la Metodología Jerárquico Matricial Difusa en proyectos de minería a cielo abierto.

Siguiendo el orden cronológico de la EIA, inicialmente se realiza un análisis del proyecto; se hace una selección de los participantes, los cuales fueron 5 expertos, 3 en Medioambiente y 2 en Minería pertenecientes al Centro de Estudios en Medioambiente (CEMA) del Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM) ubicado en Moa, Holguín.

Luego se identifican los factores, acciones e impactos que estas provocan que son valorados según su importancia y magnitud. Otro aspecto importante lo son los indicadores ambientales, encargados de medir, y en algunos casos servir para valoración, de la calidad ambiental de cada factor afectado.

El conocimiento con que cuenta el prototipo de sistema experto, está relacionado con problemas ambientales de la minería, así como la evaluación de impactos para este tipo de proyectos, partiendo de la base del diseño de la ontología que se desarrolló.

Como resultado de los intercambios con los expertos se definió el alcance y objetivos del sistema, cuyo conocimiento esta relacionado con:

- Las acciones, factores, impactos e indicadores ambientales en proyectos mineros.
- La valoración de impactos ambientales: este conocimiento esta relacionado con la asignación de valores a las variables que intervienen en el cálculo de la Importancia, a partir de la valoración que se realice de cada uno de ellas.
- Determinar los valores de la Importancia, Magnitud y Efecto de cada Impacto.
- Determinar el Efecto Global del Proyecto Minero al Medioambiente.
- Determinar el valor de cada una de las variables que intervienen en la evaluación de impactos a partir del valor de Efecto Ambiental Global.
- Brindar información relacionada con los riesgos que puede ocasionar a la salud

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

humana que los indicadores ambientales medidos por cada uno de los factores ambientales tomen determinados valores o no sean valorados de forma satisfactoria.

Según lo generado a partir del diseño de la ontología luego de un estudio de los conceptos y relaciones que deben ser incluidos en la base de conocimientos, la información que debe ser brindada al sistema para que se logre una respuesta satisfactoria debe ser la relacionada con: Acciones, Factores, Indicadores e Impactos y Afectaciones y las valoraciones realizadas a estos últimos. Según comentábamos en el Capítulo 3, esta etapa de la metodología se lleva a cabo mediante una lista de chequeo simple por parte de los expertos. El sistema permite seleccionar las acciones, factores, indicadores e impactos que intervienen en el proyecto minero evaluado.

Con la información brindada se infiere la relación existente entre las acciones los factores y los impactos, es decir, la acción X provoca el impacto Y al factor Z, relación esta que se implementa en la clase Efecto_Ambiental.

A partir de esta información se infieren también las consecuencias que provocan los impactos y los indicadores ambientales cuando sobrepasan un cierto límite.

De la información proporcionada se calcula además la Importancia, la Magnitud, y el Efecto Ambiental.

A través del intercambio con los expertos se lograron determinar las variables más empleadas por ellos, así como las clases y objetos que son necesarios para realizar los cálculos requeridos y brindar la evaluación esperada.

Para una mayor claridad en la explicación, estas variables, clases y objetos se irán mostrando según sean explicadas las siguientes etapas de la EIA vistas en el proceso de implementación del prototipo de sistema experto.

Identificación de Acciones.

La Identificación de Acciones consiste en desglosar el proyecto para encontrar cuáles son las actividades potencialmente impactantes sobre el entorno. En la metodología se propone representar las acciones mediante un árbol jerárquico:

- Clase Actuación_sobre_entorno
 - Clase Actividades
 - Clase Situaciones

El último nivel lo conforman los objetos de las distintas clases:

- **Situación I: Apertura**
 - Trabajos topográficos.
 - Trabajos de perforación geológica
 - Desbroce.
 - Construcción de vías de acceso
 - Escombreo
- **Situación II: Operación.**
 - Extracción de mineral.
 - Transporte de maquinarias y equipos.
 - Transporte de mineral
 - Mantenimiento de caminos
- **Situación III: Abandono**
 - Rehabilitación de áreas minadas

Identificación de Factores Ambientales.

En la Identificación de Factores se obtiene un modelo simplificado del entorno, como un conjunto de factores ambientales relevantes, representativos y fácilmente

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

analizables. El conocimiento adquirido sobre cada factor ambiental fue de forma general, para lograr las especificaciones deben ser entrevistados especialistas en cada una de esas ramas (Ej. Suelo, Paisaje,... etc.), por lo que debe incluirse a la base de conocimiento, en posteriores etapas de desarrollo información relacionada con estas especificidades.

Para la representación del entorno medioambiental se propone una estructura jerárquica como la que mostramos a continuación:

- Clase: Factor Ambiental
 - Clase: Medio Físico
 - Clase: Inerte
 - Clase: Biótico
 - Clase: Perceptual

Clase: Medio Socio Económico

- Clase: Socio Cultural
- Clase: Económico

El último nivel de la jerarquía lo conforman los objetos de las distintas clases:

- Clase: Inerte
 - ◇ Aire
 - ◇ Clima
 - ◇ Suelo
 - ◇ Agua
 - ◇ Geología y geomorfología
- Clase: Biótico
 - ◇ Flora

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

- ◇ Fauna
- Clase: Perceptual
 - ◇ Paisaje
- Clase: Socio Cultural
 - ◇ Infraestructura
 - ◇ Uso del suelo
- Clase: Económico
 - ◇ Economía
 - ◇ Población

Identificación de Impactos

Teniendo en cuenta la información que se proporcionó inicialmente, y la información con que cuenta la base de conocimiento, a partir de la implementación de la Metodología Jerárquica desarrollada. La jerarquía definida fue:

- Clase: Efecto Ambiental
 - Clase: Humano
 - ◇ Clase: Personas Proyecto
 - Objetos Clase Impactos
 - ◇ Clase: Personas Aledañas Proyecto
 - Objetos Clase Impactos
 - Clase: Ecológico
 - Objetos Clase Impactos

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

El nivel más bajo de esta jerarquía viene dado por los impactos y afectaciones que dieron como resultado en las encuestas desarrolladas a los expertos, mostrados en el capítulo anterior.

Valoración de impactos según su Importancia y Magnitud.

Los impactos cuando son valorados de acuerdo a su importancia se le asignan valores a cada una de las variables (valorar el impacto según cada una de ellas) que intervienen en el cálculo de la misma, para luego obtener el valor de la importancia. Para ello se definió:

- Clase: Importancia
 - Variables relacionadas con el cálculo de la Importancia:
 - Intensidad
 - Extensión
 - Momento.
 - Persistencia
 - Reversibilidad
 - Periodicidad
 - Sinergia
 - Acumulación
 - Efecto
 - Recuperabilidad

En la Valoración de los impactos, cuando se hace teniendo en cuenta la Magnitud, se definen indicadores ambientales para cada factor, en términos del cual se hace la valoración. Se definió:

- Clase: Magnitud
 - Clase: Indicadores

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Los objetos de la clase indicador se trataron en el capítulo anterior. Fueron definidas las siguientes variables que son consideradas como variables de salida del sistema:

Variables relacionadas con los indicadores ambientales:

- **Calidad _ suelo**
 - Humedad
 - Textura
 - Color
 - PH _suelo
 - Materia _orgánica
 - Salinidad
 - Sup_Erosión
 - Sup_Pendiente

- **Calidad _ paisaje.**
 - Div_ Especies
 - Uso _Suelo.
 - Calidad_Visual
 - Calidad_Paisaje

- **Calidad _ aire**
 - Nivel _Partículas.
 - Nivel _CO
 - Nivel _NO₂
 - Nivel _SO₂
 - Nivel _Ozono.
 - Nivel _Ruido.

- **Calidad _ agua**
 - Turbidez
 - Temperatura
 - PH _Agua
 - Sólidos _Suspendidos.
 - Porcentaje_Drenaje
 - Nivel_Piezométrico

- **Calidad_Clima**
 - Temperatura
 - Cantidad _Precipitaciones

- **Calidad _flora**
 - Diversidad
 - Especies _amenazadas
 - Cantidad _árboles _observables
 - Porcentaje _superficie _cubierta

- **Calidad _ fauna**
 - Especies _amenazadas
 - Diversidad _de_ especies
 - Movilidad _de_ especies

- **Calidad _ población**
 - Salud_higiene
 - Nivel_empleo

- **Calidad_ infraestructura**
 - Nivel_afectación_construcción _redes _eléctricas

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

- **Calidad_ economía**
 - Nivel_empleo
 - Incremento_ingresos
 - Nivel_inversiones
 - Valor_suelo
 - Calidad_vida
- **Calidad_ geol_ geom**
 - Carácter_relieve
 - Erosión

Luego que se realiza la valoración de los impactos y las afectaciones, el resultado se almacena en cada una de las siguientes variables.

Variables de salida del sistema relacionadas con impactos y afectaciones

- **Importancia:** Devuelve el valor de la importancia una vez valoradas todas las variables y realizado el cálculo mediante la fórmula de Conesa modificada.
- **Magnitud:** Devuelve el valor de la magnitud luego que se valoran y miden los indicadores ambientales, información que se almacena en las variables relacionadas con los indicadores ambientales, tomándose el mayor valor de estas en dependencia del factor ambiental que afecte el impacto.
- **EfectoP:** Devuelve el valor del efecto ambiental parcial del impacto o afectación que se desee conocer.
- **EfectoG:** Devuelve el valor del efecto ambiental global del proyecto.
- **Consec_impacto:** Devuelve una descripción de las consecuencias que puede provocar un determinado impacto o afectación ambiental.

El conocimiento relacionado con los indicadores ambientales, se obtiene a través de la variable de salida Consec_ indicador, muestra las consecuencias que puede ocasionar el valor que toma el indicador ambiental para la salud humana o para el medio ambiente.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

El conocimiento utilizado fue representado mediante la jerarquía de clases diseñadas en la ontología. Las reglas de producción implementadas, están relacionadas con la información concerniente a las consecuencias. La base de conocimiento del sistema debe responder a las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el Efecto Global del proyecto?
- ¿Cuáles son los Factores y Acciones que intervienen?
- ¿Qué impactos y afectaciones son provocados?
- ¿Cuál es la Importancia y Magnitud de los impactos y afectaciones?
- ¿Qué valores tienen las variables que caracterizan los impactos?
- ¿Qué valores toman los indicadores ambientales para cada uno de los factores ambientales?
- ¿Qué consecuencias trae un determinado impacto para el medio ambiente?
- ¿Qué consecuencias trae un determinado valor del indicador para el medio ambiente?

Estas preguntas guardan estrecha relación con las elaboradas para comprobar la competencia de la ontología que se desarrolló.

Forma de adquisición del conocimiento representado.

Para poder tener los elementos suficientes que contribuyeron al desarrollo de la base de conocimiento, se realizaron 4 encuestas a los 5 expertos participantes. Los resultados se analizaron utilizando el método de los rangos descrito en el capítulo 2.

- **Encuesta #1:** Tiene como objetivo realizar una selección de las variables que intervienen en la valoración de cada impacto según su importancia. Además para seleccionar las acciones relacionadas con la actividad de minería a cielo abierto.
- **Encuesta #2.** Su objetivo es seleccionar los factores e indicadores ambientales que intervienen en un proyecto de minería a cielo abierto. También con esta encuesta se obtiene información de que indicadores miden cada factor ambiental, cual es el límite permisible de ese factor y la magnitud que valor de

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

magnitud se le confiere a cada indicador según su valor.

- **Encuesta #3.** La información que se obtuvo de esta encuesta esta relaciona con la valoración de las variables que intervienen en el cálculo de la importancia en cuanto a los valores que estas deben tomar, así como los criterios que tiene en cuenta para darle valores a las variables que intervienen en el cálculo de la importancia.
- **Encuesta #4:** Su objetivo es obtener información a partir de una selección de los impactos que según su criterio se producen durante las actividades de la minería.

A partir de la aplicación de las encuestas anteriores se seleccionó el conocimiento de la base de conocimientos. Para llegar a un consenso entre las respuestas se aplicó como técnica de consulta a expertos; el Método Delphi descrito en esta memoria en el capítulo 2.

Interfaz de Fusificación.

El modulo desarrollado para este fin es el encargado de fusificar los valores de entrada que lo requieran. Se relaciona directamente con la definición de los conjuntos correspondientes a cada una de las variables previamente definidas. Su función principal es asociar a un valor numérico una etiqueta lingüística.

No siempre es necesario llevar a cabo la Fusificación, cuando el dato de entrada es una variable lingüística se trabaja directamente con su valor, por tanto en la interfaz gráfica se fusionan estas dos opciones (entrada numérica y lingüística).

Valores de entradas que deben ser fusificadas

- **Valor numérico de las variables para la valoración de impactos:** Una vez identificados los impactos ambientales, para su valoración, se introducen los valores numéricos de las variables, se busca el grado de pertenencia del mismo a algún conjunto difuso definido y se tiene una asociación de ese valor inicial al conjunto difuso que define algunas de las etiquetas lingüísticas de la variable.
- **Intervalo numérico de las variables para la valoración de impactos:** De la

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

misma forma que en el caso anterior, el intervalo en que se define la valoración del impacto se hace corresponder al conjunto difuso definido para las etiquetas lingüísticas de la variable.

- **Valor numérico asociado a la medición del indicador ambiental:** Las mediciones correspondientes a los indicadores ambientales, se asocian a su conjunto difuso, dando como resultado la etiqueta lingüística asociada.

Durante el desarrollo de este módulo, surge la necesidad de elaborar otras clases que no se incluyeron inicialmente en la etapa del diseño de la ontología.

Clase Variable_Lingüística

Funcionalidades	
Las variables lingüísticas que intervienen en el dominio del problema son manipuladas mediante esta clase. Dado un valor numérico de entrada, asigna la etiqueta lingüística correspondiente al valor, fusificar el valor de entrada.	
Propiedades	Descripción
NúmeroDif	Almacena la información del numero difuso asociado a la variable lingüística, es un objeto de la clase Número_Difuso.
Etiquetas	Almacena los nombres de las etiquetas lingüísticas que definen a la variable lingüística, es un objeto de la clase Etiqueta_Lingüística.
Nombre	Nombre de la variable lingüística, es una cadena de caracteres

Tabla 4.3: Clase Variable_Lingüística

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Clase Número Difuso

Funcionalidades	
Se encarga de dar tratamiento a todos los requerimientos relacionados con los números difusos, definir un número difuso a partir de una etiqueta o variable lingüística. Teniendo como valor una etiqueta determina el valor numérico correspondiente (defusificar). Implementa varios métodos para ello. Además permite determinar el grado de pertenencia a un determinado conjunto difuso.	
Propiedades	Descripción
Nombre_EtiqL	Nombre de la etiqueta lingüística que representa el número difuso.
Nombre_VarL	Nombre de la variable lingüística a la que pertenece la etiqueta lingüística representada mediante el número difuso.
Dado_en	Escala en la que se definen los intervalos del número difuso.
a, b, c y d	Los 4 valores numéricos que definen un número difuso trapezoidal.

Tabla 4.4: Clase Número_Difuso

La propiedad que define a la clase Etiqueta_Lingüística es el nombre.

Subsistema de explicación.

La experticidad en los sistemas expertos viene dada porque el sistema tiene la capacidad de ordenar y controlar los pasos de progresión tomados para solucionar el problema, además de que reúne conocimiento de un conjunto de expertos en la temática. Así en un momento determinado se puede rastrear la línea de razonamiento y dar respuestas a preguntas del tipo ¿Por que...”esto”?

En el prototipo de sistema experto desarrollado se propone una solución para controlar los pasos del sistema que permita emitir una respuesta.

La base de conocimiento del sistema, esta estructurado en clases y tiene instancias de estas, un menor porciento esta formado por los hechos y las reglas. Para desarrollar el módulo de explicación fue necesario construir una base de datos que se encarga de guardar los pasos que se ejecutan para obtener un resultado determinado.

Esta base de datos esta formada por las siguientes tablas:

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Campos	Descripción
Id_impacto	Identificador del impacto ambiental.
Nombre	Nombre del impacto ambiental.
Acc_imp	Importancia del impacto para esta acción del proyecto.
Acc_mag	Magnitud del impacto para esta acción del proyecto.
Efecto_parcial	Valor del efecto ambiental parcial del impacto.

Tabla 4. 5: Impactos

Campos	Descripción
Id_impacto	Identificador del impacto que tiene ese valor de importancia.
Valor	Valor de la importancia del impacto con identificador Id_impacto.
Variables que intervienen en el cálculo de la importancia en la fórmula de Conesa.	

Tabla 4.6: Importancia

Campos	Descripción
Valor	Valor de la magnitud del impacto Id_impacto.
Id_impacto	Identificador del impacto que provoca ese valor de magnitud.
Id_indicador	Identificador del indicador que mide el factor ambiental afectado, para determinar la magnitud.

Tabla 4.7: Magnitud

Campos	Descripción
Id_indicador	Identificador del indicador.
Nombre	Nombre del indicador.
Factor	Factor ambiental que mide el indicador Id_indicador si calidad ambiental.

Tabla 4.8: Indicadores

De esta forma se garantiza llevar la secuencia de cálculos seguida por el sistema para determinar el Efecto Global del proyecto. Permite además guardar la información del proyecto evaluado para luego realizar las evaluaciones temporales si así se desea, además de qué si es necesario tener una referencia a un determinado proyecto, no se necesita realizar nuevamente la evaluación, basta con consultar los resultados obtenidos.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

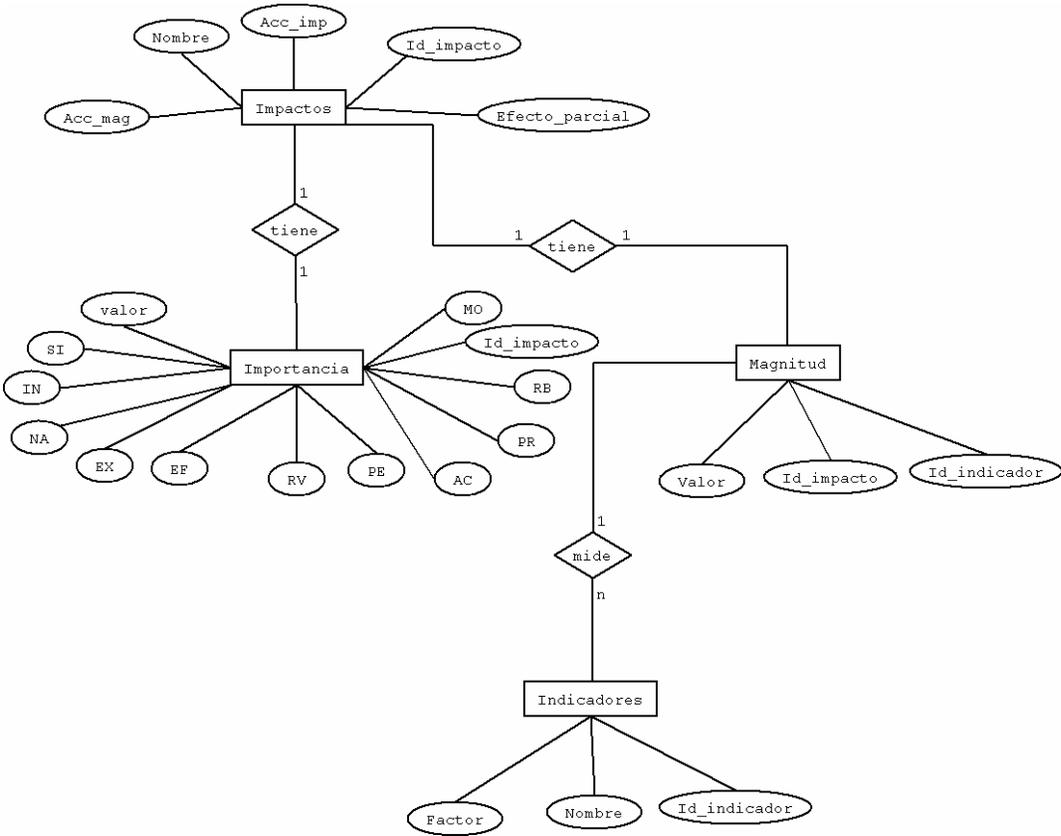


Figura 4.10: Diagrama E/R de la Base de Datos

Interfaz de defusificación

Una vez fusificados los valores de entrada, es necesario emitir una salida del sistema entendible por el usuario, en términos familiares. El sistema además de brindar información numérica si así se desea, proporciona información lingüística en sus resultados.

El resultado principal que emite el prototipo de sistema experto es el Efecto Ambiental Global del proyecto, para llegar a este se deben realizar determinados cálculos a partir de la valoración hecha a cada impacto por el experto.

El proceso de defusificación se realiza en los pasos anteriores a emitir el

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

resultado final. Una vez introducidos los valores de entrada, la valoración de las variables debe ser homogeneizada, es decir, llevar a un mismo tipo. Si la entrada fue definida como intervalo de valores numéricos o por valores numéricos, entonces es necesario, como vimos anteriormente, fusificar estos valores y luego realizar los cálculos de la importancia haciendo uso de la aritmética difusa.

Luego de obtener un resultado de importancia este valor se defusifica por algunos de los métodos conocidos de defusificación, y se busca el grado de pertenencia a algunas de las etiquetas de la importancia.

Si la mayoría de los valores de entrada son de tipo numérico, el resto de los valores que han sido introducidos como etiquetas son defusificados para realizar el cálculo haciendo uso de la fórmula. Una vez obtenido el resultado este debe ser fusificado, dando como resultado ambas informaciones, la numérica y la lingüística.

Lo mismo ocurre con las agregaciones de los valores para obtener el efecto global, si la mayor parte de la información es numérica, se realizan las agregaciones pertinentes, se tiene finalmente el resultado numérico que se fusifica para también brindar la información lingüística. En el caso de que se realicen las agregaciones haciéndose uso de las variables lingüísticas, se defusifica el resultado para obtener además la información numérica.

En los pasos relacionados con la magnitud, se procede de la misma forma, si las valoraciones de los indicadores se realizan mediante información numérica, en minoría, es necesario fusificar los datos para obtener la valoración más alta.

Si la menor parte de la información es lingüística entonces se defusifica, se busca el mayor valor y se busca el grado de pertenencia a los conjuntos difusos pertenecientes a la magnitud.

En el caso de que se desee, según nos permite la metodología, realizar el diseño de proyectos ambientales, el valor de entrada es información lingüística, por lo que se defusifica para luego generar las combinaciones de valores pertinentes para emitir el

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

resultado.

Interfaz de usuario.

La interfaz de usuario fue diseñada teniendo en cuenta el orden de los pasos a seguir en la metodología. En la interfaz principal es donde se escogen los Factores, Acciones e Impactos que tendrá el proyecto. Desde la misma se puede pasar al cálculo de la Importancia y la Magnitud.

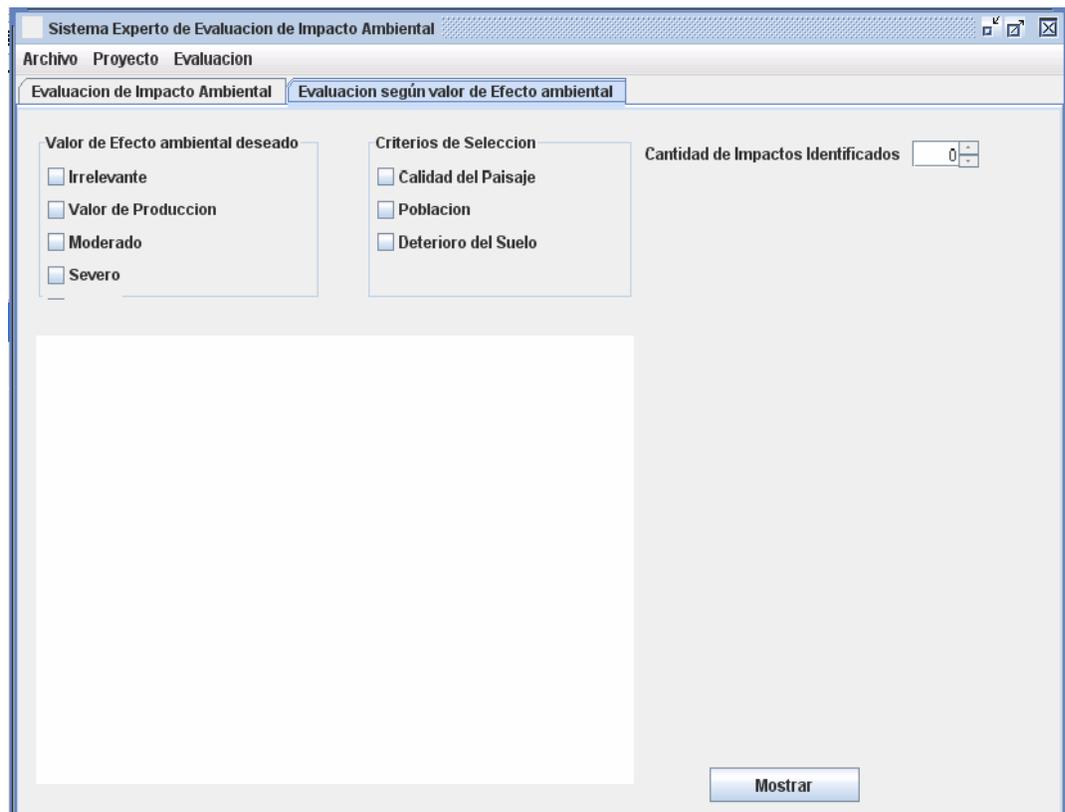


Figura 4.11: Forma Principal del sistema

Para el cálculo de la Importancia, se tiene una nueva interfaz donde en ella aparecen los impactos seleccionados y al lado las variables que intervienen en el mismo.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

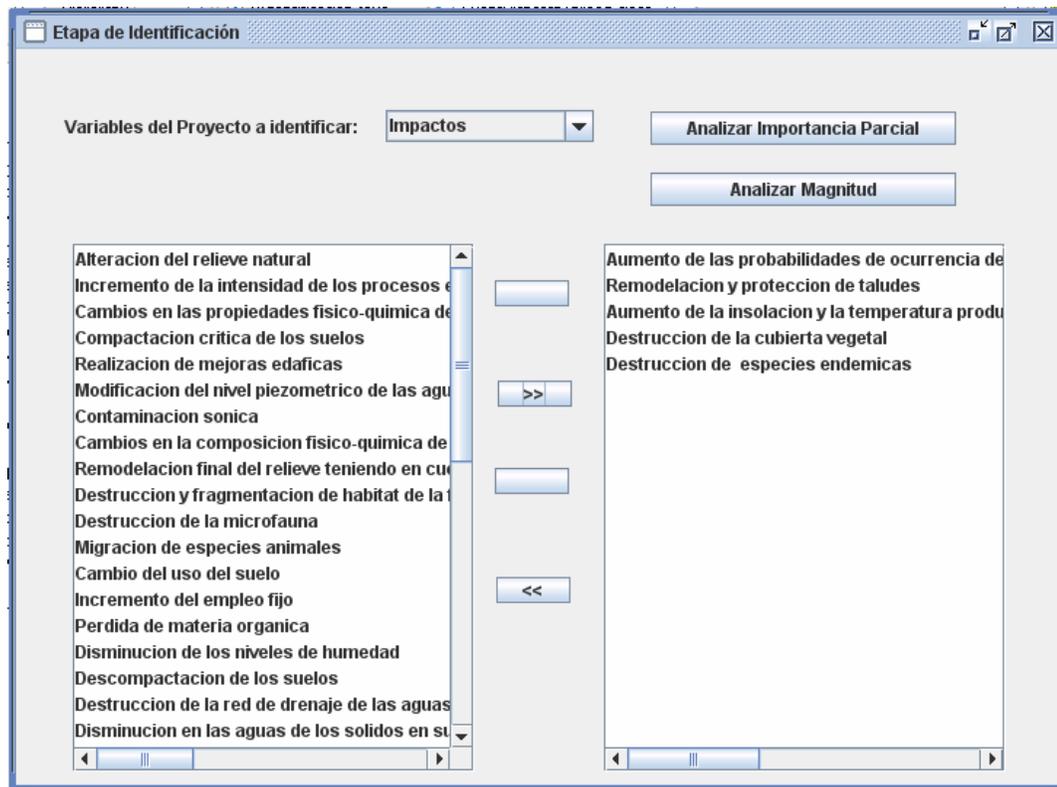


Figura 4.12: Forma Identificación de Impactos, Acciones y Factores

El cálculo de la Magnitud debe hacerse valorando los Indicadores Ambientales relacionados con cada Factor Ambiental. Como cada factor tiene sus indicadores propios entonces se cuenta con una interfaz para cada uno.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

Etapa de Valoración de Impactos Ambientales

Variables para la Valoración
Intensidad

Aumento de las probabilidades de ocurrencia d...
Remodelacion y proteccion de taludes
Aumento de la insolacion y la temperatura prod...
Destruccion de la cubierta vegetal
Destruccion de especies endemicas

Etiquetas Linguisticas para la Valoración
 Muy Poco Mucho Mas o Menos

Porciento para la Valoracion

INTENSIDAD
 Baja
 Media
 Alta
 Muy Alta
 Total

Guardar

Figura 4.13: Forma Calculo de la Magnitud e Importancia

También se cuenta con la interfaz encargada de:

- Mostrar los resultados parciales pertenecientes a cada uno de los impactos.
- Mostrar los resultados de las agregaciones de la Importancia y la Magnitud para un subconjunto de Acciones y Factores.
- Mostrar las consecuencias de ciertos resultados.
- Mostrar por qué se llegó a cierto resultado.

Características de la Herramienta utilizada.

El sistema desarrollado fue hecho en el lenguaje CLISP, herramienta que se emplea para construir sistemas expertos, que tiene características tales como:

- **Representación del Conocimiento:** Soporta diferentes paradigmas de programación: basado en reglas, orientado a objetos y procedural/funcional.
- **Portabilidad:** Puede ser utilizado en diferentes sistemas operativos.

Una Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental. Un Sistema Experto para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos mineros.

- **Integración/Extensibilidad:** Código escrito en CLIPS puede ser embebido en diferentes lenguajes de programación (C, Java, ADA).
- **Desarrollo Interactivo:** Provee herramientas para el debugueo, ayuda online, un editor integrado. Además de una interfaz que implementa menues, ventanas desarrolladas para ambientes Windows, MacOS, entre otros.
- **Verificación/Validación:** Incluye soporte para diseño modular y particionamiento de la base de conocimientos, chequeo de restricciones dinámico y estático de slots y argumentos de funciones y análisis semántico de patrones de reglas para determinar inconsistencias.
- **Completamente documentado:** Posee una extensa documentación incluyendo un Manual de Referencias y una Guía de Usuario.
- **Bajo Costo:** Es un software de dominio publico.

En la implementación de nuestro sistema se empleo el paradigma procedural/funcional, y el orientado a objetos. Utilizando el entorno de desarrollo Java 2.0 que permite programar en CLIPS y además realizar interfaces visuales con este lenguaje.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La investigación que hemos descrito en esta memoria integra aspectos de Inteligencia Artificial a la evaluación de impacto ambiental. Se parte de las encuestas realizadas a las personas encargadas de desarrollar las evaluaciones de impactos a proyectos de minería en la región de Moa, Cuba. Con los resultados obtenidos, se desarrolla el Modelo Jerárquico de Evaluación de Impacto Ambiental.

Teniendo en cuenta que la información que se maneja en el ámbito de las evaluaciones, es en su mayoría cualitativa, se incluye en las evaluaciones ambientales, la Teoría de Conjuntos Difusos, que permite tratar indistintamente información cualitativa y cuantitativa.

El modelo desarrollado, estructura de forma jerárquica el proceso de evaluación de impacto ambiental, partiendo de los aspectos más generales hasta los más particulares, obedeciendo a la forma de desarrollar las evaluaciones de los encuestados. Además la jerarquización se utiliza en la descripción de los factores ambientales y las actividades del proyecto.

Como característica del modelo desarrollado, se encuentra la posibilidad de realizar evaluaciones parciales, tanto desde el punto de vista temporal, con el fin de realizar comparaciones en el tiempo teniendo en cuenta los cambios que pueden haber ocurrido en la zona explotada entre espacios de tiempo diferentes, así como también desde el punto de vista espacial, que permite obtener evaluaciones conociendo a priori evaluaciones desarrolladas en otras zonas del proyecto. Las evaluaciones de impacto teniendo en cuenta las áreas del proyecto también son desarrolladas siguiendo una estructura jerárquica.

Por otro lado, y atendiendo a la necesidad planteada por los expertos, el modelo da la posibilidad de diseñar proyectos ambientales “a medida”, es decir, dado un valor deseable de Efecto Ambiental Global nuestro método muestra cual debe ser el comportamiento de las variables ambientales que intervienen en la evaluación. Este

Conclusiones y trabajo futuro

aspecto es de vital importancia, teniendo en cuenta las exigencias de las autoridades cubanas.

A partir de los aspectos anteriores, y para contribuir de forma práctica con las personas encargadas de realizar las evaluaciones ambientales mineras, se desarrolla un Sistema Experto de Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos mineros, cuya base de conocimiento se construye a partir de una ontología diseñada y desarrollada al efecto.

Aunque el modelo haya surgido a partir de particularidades de la evaluación de impacto en la región minera de Moa, también puede ser generalizado para otros tipos de proyectos. En este sentido en la memoria se presenta un Modelo Jerárquico Genérico para la Evaluación de Impacto.

La herramienta inteligente desarrollada en la investigación se implementó teniendo en cuenta como aspecto fundamental el empleo de software libre. En el diseño de la ontología se utilizó el Protégé, que además permite sea exportado el conocimiento en código CLIPS, que fue el lenguaje y shell utilizado para la implementación de la base de conocimiento. Para la interfaz de usuario utilizamos la librería dinámica de Java para CLIPS, JCLIPS, también de distribución gratuita, que facilita la comunicación entre el CLIPS y el Java, permitiendo hacer uso de las facilidades y funcionalidades de este lenguaje durante el desarrollo del software.

Los requerimientos de funcionamiento del sistema, se necesitaría para su ejecución un procesador Pentium III, Pentium IV o posterior, a más de 512 MGz de velocidad y memoria RAM superior a los 256 Mb. El sistema puede ser utilizado tanto con Sistema Operativo Windows 2000 o superior y Linux.

Conclusiones y trabajo futuro

Como continuación de la investigación que se ha desarrollado, pretendemos encaminarnos a:

- Aplicar el Modelo Genérico de Evaluación de Impacto Ambiental en proyectos de otra naturaleza, iniciando por actividades que hayan sido evaluadas utilizando otras metodologías y puedan ser comparados los resultados obtenidos.
- Enriquecer la base de conocimiento del sistema experto desarrollado, sobre todo en cuestiones relacionadas con proyectos de naturaleza no minera.
- Incluir a la herramienta inteligente desarrollada aspectos de Aprendizaje y en mayor profundidad inclusión de nuevos conocimientos por parte de los expertos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anile A.M., Deodato S., Pricitera D., “Implementing fuzzy arithmetic (application to environmental impact analysis)”, Fuzzy sets and system, 1995.
- [2] Arencibia S., Contreras E., “Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de de proyectos de infraestructura deportiva”, 2000.
- [3] Auke F., “Fuzzy logic for planning and decision making”, Kluwer academic publishers, Dordrecht, Boston, 1997.
- [4] Ayala Caicedo F.J., “Evaluación y corrección de impactos ambientales”, Madrid, Instituto Tecnológico Geominero de España, 1992.
- [5] Barba-Romero S., Pomerol J.Ch. “Multicriterion Decision in management: Principles and practice” Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 2000.
- [6] Beynon M.J., “Understanding local ignorance and non-specificity within the DS/AHP method of multi-criteria decision making”, European Journal of Operational Reseach, 2005.
- [7] Bonissone P.P., “A fuzzy sets based linguistic approach: Theory and applications”, Approximate reasoning and decision analysis, North Holand, 1992.
- [8] Buckley J.J., “Fuzzy Hierarchical analysis”, 1999.
- [9] CEPRONIQUEL, “Estudio Línea Base del Yacimiento Punta Gorda”, Departamento Técnico Subdirección Mina Cdte. Ernesto Che Guevara. Moa Cuba, 1998.
- [10] Chen S.J., Hwang C.L, “Fuzzy Multi-attribute decision making methods and applications”, Springer-Merlag, 1992.
- [11] CITMA , “Sistema de Gestión Ambiental Empresarial del CITMA”, 2001
- [12] CLIPS “User’s Guide and Reference Manual Version 1.0”.
- [13] Conesa Fernández, V, “Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental” 2da edición Madrid Editorial Madrid Prensa, 1997.
- [14] Corazzon R., “Descriptive and Formal Ontology. A resource guide to contemporary research” (<http://www.formalontology.it>).

Bibliografía

- [15] Delgado Díaz, Carlos J. Cuba Verde, “En busca de un Modelo para la sustentabilidad en el S/XXI”, Ciudad de La Habana: José Martí,. 430p, 2000.
- [16] Delgado M., Verdegay J.L, Vila M.A., “On aggregation operations of linguistic labels”, International Journal of Intelligent System, 1993.
- [17] Delgado M., Verdegay J.L, Vila M.A., “Ranking fuzzy number using fuzzy relations”, Fuzzy sets and system, 1998.
- [18] Denny M., “Ontology Building: A Survey of Editing Tools”, 2002.
- [19] Duharte, O. “Técnicas Difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental”, Tesis Doctoral, 2000.
- [20] Eckel B. “Thinking in Java, 3rd Edition”, 2002.
- [21] Espinosa, G. “Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental”, 2000.
- [22] Fernández G.,”Representación del conocimiento en sistemas inteligentes”.
- [23] Greco, S., Matarazzo, B. Slowinski, R. “Rough set methodology for sorting problem in presence of multiple attributes and criteria. European Journal or operational Research”, 2001.
- [24] Greco, S., Matarazzo, B. Slowinski, R., “Dealing with missing values in rough set analysis of multi-attribute and multi-criteria decision problems”, 2000.
- [25] Gruber T. R., “A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition 5(1)”.
- [26] Hernández, T., “Evaluación de Impacto Ambiental en el Yacimiento Punta Gorda”, Tesis de Maestría, 2003.
- [27] Janssen R. “Multiobjective decision support for environmental management”, Dordrecht: Kluwer Academic, 1996.
- [28] Krajnc D., Glavi P., “A model for integrated assessment of sustainable development”, European Journal of Operational Reseach, 2005.
- [29] Landeta, J., “El metodo Delphi” Ariel, 1999.
- [30] León Peláez, J., “Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos de desarrollo”, 2004.
- [31] Ley 81 para la Protección del Medio Ambiente (Cuba).

Bibliografía

- [32] Linstone H.A., TURROF, M., “The Delphi method, techniques and applications, Addison wesley publishing”, 1975.
- [33] Magrini, A. “A Avaliação de impactos ambientais. En: Meio ambiente. Aspectos técnicos e econômicos “(Ed. S.Margulis), 1990.
- [34] Martin J.M., Delgado M, Blanco A., Polo M.P., “Multicriteria Decisions with qualitative information”, Internacional Federation for Automatic Control, University of Algarve, Portugal, 2003.
- [35] Martin J.M., Fajardo W., Blanco A., Polo M.P., “Constructing Linguistic versions of multicriteria decision support system preference ranking organization methods for enrichment evaluation I y II”, International Journal of Intelligent System, 2003.
- [36] Martin Ramos, J.M., “Modelos Multicriterios Difusos. Aplicaciones” Tesis Doctoral, 2003.
- [37] Meier K., “Methods for decision making with cardinal numbers and additive aggregation ”, Fuzzy sets and system, 1997.
- [38] Mikhailov L., Tsvetinov P., “Evaluation of services using a Fuzzy Analytic Hierarchy Process”, 2002.
- [39] Munda G., “Multicriteria evaluation in a fuzzy environment. Theory and applications in ecological economics”, 1997.
- [40] Natalya F., NoyDeborah L., “Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology”. McGuinnes. Stanford University, 2002.
- [41] Poch M., Comas J., “Designing and building real environmental decision support systems”, Environmental Modelling and software.
- [42] Protégé-2000 User's Guide. Stanford Medical Informatics, Stanford University.
- [43] Ramanathan R., Ganesh L.S. “Using AHP for resource allocation problems”
- [44] Rodríguez Pacheco, R, Candela, L. “Contaminación de las aguas subterráneas”.
- [45] Romero C., “Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones”, 1993.
- [46] Saaty T., “Decision-making with the AHP: Why is the principal

Bibliografía

- eigenvector necessary”, *European Journal of Operational Research*, 2003.
- [47] Saaty, T. L., “The Analytic Hierarchy Process”, New York, 1980.
- [48] Saaty, T.L., “How to make a decision?” Chapter 1. In: Saaty, T.L., Vargas, L.G. (Eds.), *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer International, 2001.
- [49] Sadiq, R., “Drilling waste discharges in the marine environment: a risk based decision methodology”, PhD dissertation, Memorial University of Newfoundland, St. John’s, NL, Canada, 2001.
- [50] Sadiq, R., Husain, T., Veitch, B., Bose, N., “Risk management of drilling waste disposal in the marine environmental holistic approach”. *Oceanic Engineering International*, 2003.
- [51] SANZ C., J.L., “Concepto de impacto ambiental y su evaluación” En: *Evaluación y corrección de impactos ambientales*, Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. 302 p, 1999.
- [52] *Semantic Web Kickoff in Finland: Vision, Technologies, Research, and Applications*, 2002.
- [53] Studer R S., Benjamins D. F., “ Knowledge Engineering: Principles and Methods”., 1998.
- [54] Vaidya O.S., Kumar S., “Analytic hierarchy process: An overview of applications”, *European Journal of Operational Research*, 2004.
- [55] Vinke Ph., “Multicriterio decision aid”, 1992.
- [56] Yager R.R., “An approach to ordinal decision making”, 1996.
- [57] Zanakis S.H., Solomon A., “Multi-attribute decisionmaking: A simulation comparison of select methods”, *European Journal of Operational Research*, 2005.
- [58] Zimmermann H.J., “Multicriteria decision making in crisp and fuzzy environments”, 1986.
- [59] Zopounidis C., Doumpos M., “Multicriteria classification and sorting methods : A literature review”, 2002

ANEXOS

A1 Teoría de Subconjuntos Difusos

Introducción

El desarrollo de soluciones informáticas está dirigido a la solución de problemas del mundo real. Cuando se trabaja con este tipo de problemas nos encontramos con información afectada por ciertas imperfecciones que son difíciles de modelar por los modelos clásicos de que disponemos. Tenemos informaciones que se verán afectadas por imprecisiones al momento de definir las o por la incertidumbre que pueda existir en el valor obtenido de determinada fuente.

Existe un ejemplo clásico para mostrar la imperfección que pueda tener una información. Imaginemos que queremos representar la estatura de una persona. Si contamos con un metro podremos medir con exactitud su altura, pero si no podremos estimar su valor. Para los humanos siempre será más fácil decir que una persona es *alta*, *media* o *baja* que tratar de estimar su estatura en metros. Debemos entonces respondernos la siguiente pregunta: ¿Cómo representar los valores *alto*, *media*, *bajo* para la estatura? Ahora, pensemos que el valor de la estatura de una persona lo estamos estimando a una determinada distancia del individuo; mientras más alejado estemos de la persona mucho más difícil será estimar el valor de la altura y entonces nuestra información también tendrá un incertidumbre intrínseca que me puede hacer dudar del valor de la información.

Para la representación de este tipo de información se han desarrollado varias teorías, entre ellas la teoría de la probabilidad, la teoría de la evidencia, el uso de factores de certeza o la teoría de subconjuntos difusos.

En los últimos 20 años ha habido un despunte en el desarrollo de aplicaciones en todo el mundo que incorporan en sus modelos la teoría de conjuntos difusos. En la Ciencia de la Computación esta teoría se ha ido utilizando en cada una de sus áreas.

La base de la teoría de subconjuntos difusos está en la teoría clásica de

conjuntos.

Los conjuntos clásicos pueden estar representados de tres formas por medio de una definición extensiva, utilizando una proposición o usando una función característica. Dando una definición extensiva: se indica una lista con los miembros que forman el conjunto $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Cualquier otro elemento que no esté en la lista no pertenecerá automáticamente al conjunto.

- Proporcionando una proposición P : el conjunto estará formado por aquellos elementos del universo que satisfacen la proposición, $A = \{x \mid P(x)\}$ (la proposición puede ser *verdadera* o *falsa*).
- Una función característica: se define una función que toma valores en el rango $\{0,1\}$ representando la pertenencia de un elemento al conjunto (ya que te empeñas en dejar esto, explica que es un caso particular de lo segundo).

Como se aprecia, la teoría de conjuntos clásicos no proporciona la posibilidad de representar conjuntos de elementos en los cuales exista incertidumbre respecto a su pertenencia al conjunto.

La lógica difusa es una teoría que se ha implantado en el campo científico-técnico que en definitiva nos resulta realmente útil si nos interesa que un determinado dispositivo (maquina, programa, aplicación...) “piense” tal y como lo haría la mente humana. Esta lógica se basa fundamentalmente en crear una relación matemática entre un elemento y un determinado conjunto difuso con el fin de que una computadora sea capaz de realizar una valoración similar a como lo hacemos nosotros.

Tiene múltiples aplicaciones, actualmente existen todo tipo de instrumentos, máquinas y procedimientos controlados borrosamente, adaptándose "inteligentemente" a cada situación particular: acondicionadores de aire, frigoríficos, lavadoras / secadoras, aspiradoras, hornos microondas, mantas eléctricas, ventiladores, autoenfoques fotográficos, estabilizadores de imágenes en grabadoras de vídeo, transmisiones de automóviles, suspensiones activas, controles de ascensores, dispensadores de

anticongelantes para los aviones en los aeropuertos, sistemas de toma de decisiones industriales o económicas, y un largo etcétera en el que se incluye hasta un helicóptero no tripulado, cuyo prototipo, de más de 4 m. de envergadura ha sido capaz de mejorar al convencional, consiguiendo su estabilización tras perder una pala, cosa que ningún piloto humano ha logrado jamás.

Esta lógica es una lógica multivaluada y sus características principales, presentadas por Zadeh son:

. En la lógica difusa, el razonamiento exacto es considerado como un caso particular del razonamiento aproximado.

- Cualquier sistema lógico puede ser trasladado a términos de lógica difusa.
- En lógica difusa, el conocimiento es interpretado como un conjunto de restricciones flexibles, es decir, difusas, sobre un conjunto de variables.
- La inferencia (proceso mediante el cual se llega a un resultado, se obtienen consecuencias o se deduce una cosa de otra) es considerada como un proceso de propagación de dichas restricciones.
- En lógica difusa, todo problema es un problema de grados.

El estudio de Impacto Ambiental difuso pretende ser un modelo general de evaluación de impacto ambiental que nos permita definir la forma de realizar el proceso de EsIA, especificando para ello distintas expresiones de agregación de información lingüística sobre las Importancias de Impactos medidas, las Medidas Correctoras a ser aplicadas, y el conjunto de Magnitudes para el calculo de la Calidad Ambiental.

Este modelo difuso se basa, al igual que el crisp, en la metodología de las Matrices de Leopold.

- Una matriz de Importancia del Impacto, que cuantifica mediante una expresión matemática, definida sobre un conjunto de variables lingüísticas, y que caracteriza los efectos producidos por las acciones del proyecto sobre los distintos factores ambientales.

- Una matriz de Medidas Correctoras, que determina el conjunto de acciones a llevar a cabo para recuperar el medio ambiente o como mínimo mitigar los efectos perniciosos de las acciones del proyecto sobre los distintos factores ambientales, y en el caso de que sea un impacto positivo, potenciar el mismo.
- Una matriz de Magnitudes que determinan la Calidad Ambiental, tras producirse el efecto de las distintas acciones del proyecto sobre los diferentes factores ambientales.

Conjuntos Difusos (*Fuzzy Sets*)

El término *Técnicas difusas* hace referencia a todas aquellas estrategias de representación del conocimiento y/o análisis de la información basadas en la teoría de conjuntos difusos propuesta por Zadeh [19]. Las técnicas difusas se basan en el concepto de *conjunto difuso*.

Los conjuntos difusos son una generalización de los subconjuntos clásicos en el sentido de que los amplían pues permiten la descripción de nociones “vagas” e “imprecisas”. Relajan la restricción de los conjuntos clásicos de pertenencia o no-pertenencia absoluta al mismo. Es necesario hacer notar que muchos de estos conceptos con naturaleza “imprecisa”, si no todos, responden a criterios subjetivos.

No es fácil determinar si un determinado elemento *posee o no la propiedad común* del conjunto, ya que la propiedad puede poseerse *parcialmente*. Por ejemplo, supóngase que se desea construir el conjunto de las *ciudades populosas* de un cierto país. Para ello deberíamos determinar cuáles de las ciudades de ese país poseen la propiedad *ser populosa*, y podríamos, por ejemplo, decidir que lo son aquellas cuyo último censo alcance o sobrepase una cierta cifra, digamos 500.000 habitantes. No obstante, esta solución presenta algunas dificultades como las siguientes:

- Dos ciudades cuyos censos hayan sido de 500.000 y 3'000.000 de habitantes serán consideradas como *ciudades populosas*, y sin embargo la primera no lo es tanto como la segunda.

- Dos ciudades cuyos censos hayan sido de 499.999 y 500.000 habitantes, pese a tener una población muy semejante, son catalogadas de forma diferente: la primera no pertenece al conjunto de las *ciudades populosas*, y la segunda sí. Supóngase que, en el país del ejemplo, de este criterio depende el monto de las ayudas que el gobierno central destina a las ciudades ¿aceptarían los ciudadanos de la primera recibir menos dinero que los de la segunda por un único habitante de diferencia?

Con este ejemplo se pone de manifiesto que existen ocasiones en las que es conveniente tener en cuenta que la propiedad que define al conjunto puede cumplirse *en cierto grado* (hay ciudades más populosas que otras), y que por lo tanto no es posible establecer *tajantemente* si un elemento pertenece o no al conjunto.

- La pertenencia de un elemento a un conjunto pasa a ser un concepto *difuso o borroso*. Para algunos elementos puede no estar clara su pertenencia o no al conjunto.
- Dicha pertenencia puede ser cuantificada por un grado. Dicho grado se denomina habitualmente como *grado de pertenencia* de dicho elemento al conjunto y toma un valor en el intervalo $[0,1]$ por convenio.

Un **Conjunto Difuso** A sobre un universo de discurso Ω (intervalo finito o infinito dentro del cual el conjunto difuso puede tomar un valor) es un conjunto de pares

$$A = \{\mu_A(x) / x : x \in \Omega, \mu_A(x) \in [0,1] \subseteq \mathbb{R}\}$$

donde $\mu_A(x)$ se denomina **grado de pertenencia** del elemento x al conjunto difuso A [19]. Este grado oscila entre los extremos **0** y **1** del dominio de los números.

$\mu_A(x)=0$ indica que x no pertenece en absoluto al conjunto difuso A.

$\mu_A(x)=1$ indica que x pertenece totalmente al conjunto difuso A.

Conceptos Fundamentales.

α -Cortes

Al establecer un grado de pertenencia a los conjuntos difusos se está admitiendo que algunos de los elementos del conjunto cumplen *más o mejor* la propiedad común del conjunto.

Principio de Extensión

La principal diferencia entre los conjuntos crisp y los conjuntos difusos consiste en que para los primeros los elementos sólo tienen dos posibilidades, pertenecer o no pertenecer, mientras que para los segundos se puede pertenecer *en algún grado*.

Esto mismo puede decirse de otra forma: Mientras que en los conjuntos difusos los elementos pueden tener cualquier grado de pertenencia (entre 0% y 100%), en los conjuntos crisp sólo hay dos posibilidades: tener grado de pertenencia del 0% (no pertenecer) o del 100% (pertenecer). Visto así, los conjuntos crisp son un caso particular de los conjuntos difusos, y por esta razón, se dice que los conjuntos difusos son una *extensión* de los conjuntos crisp. Lo anterior es muy útil a la hora de trabajar con conjuntos difusos, ya que se conocen muy bien muchas funciones sobre conjuntos crisp. La forma usual de encontrar una *función sobre conjuntos difusos* es buscar cuál es la que serviría si se tratase de conjuntos crisp, y *extenderla* al caso de los conjuntos difusos.

Variables Lingüísticas

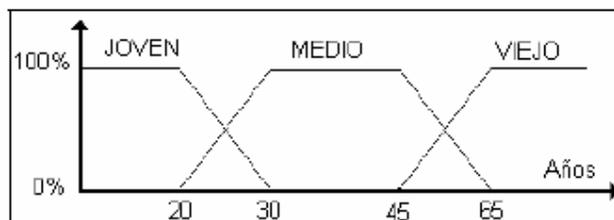
Una *variable lingüística* es una variable que representamos con *palabras* en lugar de hacerlo con números [19]. Como veremos a continuación, los conjuntos difusos permiten representar adecuadamente algunas de estas variables. Mientras que los ordenadores están diseñados para trabajar con números, los seres humanos generalmente razonamos empleando palabras; por ejemplo, si tenemos que enseñar a alguien cómo conducir un coche, preferiremos decir “*acelera suavemente*” que “*acelera a 0.7 m/s²*”.

Anexos

Una *Variable Lingüística* se caracteriza por un conjunto de cinco elementos (Ψ , $T(\Psi)$, U , G , M), donde ψ es el nombre de la variable; $T(\Psi)$ es el *conjunto de términos* de ψ , es decir la colección de los valores lingüísticos; U es el universo de discurso; G es una regla sintáctica que genera los términos en $T(\Psi)$; M es una regla semántica que asocia a cada valor lingüístico X su *significado* $M(X)$, que es un conjunto difuso sobre U .

Un ejemplo típico de variable lingüística es la *edad* de las personas. Para hablar de la edad de alguien, usualmente le asignamos una *Etiqueta* como la de *bebé*, *niño*, *adolescente*, *joven*, *adultos*, *viejos* o *ancianos*. Sin embargo, no existen fronteras exactas entre esas etiquetas (¿cuándo se pasa de niño a adolescente?), y por lo tanto podemos pensar en describirlas mediante conjuntos difusos. Ejemplo de cómo se podría definir la variable lingüística *Edad*, empleando sólo tres etiquetas *Joven*, *Edad*

Media y *Viejo*. Por supuesto, el número de etiquetas, y el conjunto difuso asociado a cada una de ellas dependerá de la aplicación que se vaya a efectuar de la Variable Lingüística.



Números Difusos

Un número difuso es un conjunto difuso con algunas particularidades, de las cuales destacamos las siguientes: primero, el universo de discurso es el conjunto de los números reales; segundo, al menos uno de los números reales tiene un grado de pertenencia del 100%; además, debe cumplir otras propiedades matemáticas que aseguran que la forma del conjunto difuso no es “*demasiado extraña*”¹⁵, de tal manera que los α -cortes siempre son intervalos cerrados.

Un tipo de número difuso muy empleado es el que se conoce como *número*

difuso trapezoidal, debido a la forma de su función de pertenencia. En el contexto de esta tesis se usa la nomenclatura según la cual un conjunto difuso trapezoidal con una función de pertenencia representada por $T(a,b,c,d)$.

Un número difuso es un conjunto difuso definido sobre \mathbf{R} , normal, convexo y semicontinuo superiormente.

La función de pertenencia $\mu_T(x)$ de un número difuso trapezoidal $T(a,b,c,d)$ es

$$\mu_T(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} & \text{si } a < x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & \text{si } c < x \leq d \\ 0 & \text{si } d < x \end{cases}$$

Tipos de números difusos

Números triangulares

Como su propio nombre indica, estos números presentan forma triangular, por lo que quedan perfectamente definidos con tres números reales que indican las abscisas de los vértices; las ordenadas se obtienen por la propia definición del número difuso, los valores de los extremos están a altura cero y el valor central estará a uno.

Números trapezoidales

Estos números se representarán mediante cuatro reales que definirán las abscisas de los cuatro vértices del trapecio.

Números L-R

Los números L-R son una superclase de la gran mayoría de los tipos de números difusos. L-R serán todos aquellos números que presenten en su parte izquierda y derecha la misma función con cambios en algún parámetro. Realmente los dos tipos descritos antes, triangulares y trapezoidales, pertenecen a este grupo (partes derecha e

Anexos

izquierda son funciones lineales), pero son tan utilizados que merecen mención aparte.

L-R Gaussiano

El *tipo Gaussiano* queda caracterizado a partir de los parámetros que definen la distribución de Gauss, esto es: media, desviación típica, mínimo y máximo. La necesidad de incluir los parámetros mínimo y máximo se debe a que la función de Gauss está definida en toda la recta real, mientras que los números difusos han de tener un soporte o alfa-corte a nivel cero de longitud finita.

L-R Gaussiano Doble

Estos números se componen de dos funciones de Gauss (rama izquierda, rama derecha) las cuales poseen cada una su media y su desviación típica. Por lo tanto es posible que presenten un uno-corte con longitud no nula. Además es necesario especificar el mínimo y el máximo por las razones mencionadas la página anterior.

L-R Parabólico

La forma que presentan es la de una parábola por lo que quedarán definidos con los tres parámetros que forman el trinomio de segundo grado. Para que la expresión sea la función de pertenencia de un número difuso el coeficiente que multiplica al término de mayor grado ha de ser negativo y el vértice de la parábola debe estar en un punto con ordenada igual a uno.

L-R Parabólico doble

En este tipo de número L-R será necesario aportar la ecuación de las dos parábolas que definen cada una de las ramas del número difuso.

Aritmética Difusa

La *aritmética difusa* es el conjunto de estrategias empleadas para operar con números difusos. En otras palabras, mediante la aritmética difusa podemos sumar “*más o menos 3*” con “*un poco menos de 2*”. En general, se emplea el *principio de extensión*

Anexos

para definir las operaciones básicas (suma, resta, etc.) a partir de las operaciones sobre números reales convencionales.

Al trabajar con números trapezoidales se pueden obtener algunas expresiones sencillas, por ejemplo, si $A=T(a,b,c,d)$ y $B=T(e,f,g,h)$ son dos números trapezoidales, su suma y su resta son otros números trapezoidales que se pueden calcular como:

$$A+B=T(a+e, b+f, c+g, d+h)$$

$$A-B=T(a-h, b-g, c-f, d-e)$$

Producto

$$[a, b] * [d, e] = [\min(ad, ae, bd, be), \max(ad, ae, bd, be)]$$

Cociente

$$[a, b] / [d, e] = [a, b] * [1/e, 1/d] = [\min(a/d, a/e, b/d, b/e), \max(a/d, a/e, b/d, b/e)]$$

$0 \notin [d, e]$

Calculo del máximo y del mínimo

$$\max([a, b], [d, e]) = [\max(a, d), \max(b, e)]$$

$$\min([a, b], [d, e]) = [\min(a, d), \min(b, e)]$$

El resultado de las operaciones con números difusos es más ancho que los números originales, es decir que hay más incertidumbre en el resultado. La incertidumbre se acumula en cada operación matemática.

A2 Descripción de los indicadores ambientales y sus etiquetas lingüísticas.

Indicador Ambiental	Descripción	Etiquetas Lingüísticas
AIRE		
Concentración de Monóxido de carbono (CO)	Mide la concentración de CO en la atmósfera	Bueno Moderado Malsano sensibles Malsano Muy malsano Peligroso
Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NO ₂)	Mide la concentración de NO ₂ en la atmósfera	Bueno Moderado Malsano sensibles Malsano Muy malsano Peligroso
Concentración de Dióxido de Azufre (SO ₂)	Mide la concentración de SO ₂ en la atmósfera	Bueno Moderado Malsano sensibles Malsano Muy malsano Peligroso
Concentración de Ozono	Mide la concentración de Ozono en la atmósfera	Bueno Moderado Malsano sensibles Malsano Muy malsano Peligroso
Material particulado (PM ₁₀ , PM ₂₅ , Polvo)	Mide la concentración de partículas en la atmósfera	Bueno Moderado Malsano sensibles Malsano Muy malsano Peligroso
Ruido	Mide los niveles de ruido en la atmósfera	Bajo Tolerable Ruidoso
AGUA		
Partículas en suspensión	Mide la concentración de sólidos en suspensión en el agua	Buena Aceptable Severa Crítica
Turbidez	Mide el nivel de	Nulo

Anexos

	turbidez del agua	Compatible Moderado Severo Crítico
Ph	Mide el nivel del PH de agua	Extremadamente ácido Muy fuertemente ácido Fuertemente ácido Moderadamente ácido Neutro Moderadamente básico Fuertemente básico Extremadamente básico
Temperatura	Diferencia de la temperatura del agua con respecto a la ambiental	Nulo Compatible Moderado Severo Crítico
SUELO		
Superficie afectada por la erosión del suelo	Porcentaje del total del área del proyecto afectado	No erosionado Despreciable Moderada Extensiva
Nivel de humedad	Mide nivel de humedad del suelo	Seco Ligeramente seco Húmedo Muy húmedo
Pendiente por superficie afectada	Porcentaje del total del área del proyecto afectada por la pendiente	Nulo Compatible Moderado Severo Crítico
Espesor de capa fértil (Materia Orgánica)	Nivel de nutrientes incorporados en el suelo	Muy deficiente en materia orgánica Deficiente en materia orgánica Normal en materia orgánica Apreciable en materia orgánica Humífero Muy humífero
Salinidad	Nivel de salinidad del suelo	No salino Ligeramente salino Salino Muy salino Extremadamente salino

Ph	Nivel de Ph de suelo	Muy fuertemente acido Fuertemente acido Medianamente acido Neutro Ligeramente alcalino Moderadamente alcalino Fuertemente alcalino Muy fuertemente alcalino
CLIMA		
Temperatura	Diferencia con los históricos de temperatura	Buena Aceptable Severa Critica
Cantidad de precipitaciones	Diferencia con los históricos de precipitaciones	Buena Aceptable Severa Critica
FLORA Y VEGETACION		
Diversidad	Diversidad entre los diferentes tipos de especies en vegetación	Excepcional Alta Aceptable Baja Uniformidad paisajística
Especies amenazadas	Porcentaje del total de especies, las que se encuentran bajo amenaza por el impacto	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
Cantidad de árboles observables	Percepción visual de los árboles que rodean el área del proyecto	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
Porcentaje de superficie cubierta	Área del proyecto cubierta por la vegetación (porcentaje respecto al total del área)	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
FAUNA		
Especies amenazadas	Porcentaje del total de especies, las que se encuentran	Nulo Compatible Moderado

Anexos

	bajo amenaza por el impacto	Severo Critico
Diversidad de especies	Diversidad entre los diferentes tipos de especies animales	Excepcional Alta Aceptable Baja Uniformidad paisajística
Movilidad de especies	Porcentaje de especies que se trasladan de hábitat por causa del proyecto	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
PAISAJE		
Cantidad de árboles observables	Percepción visual de los árboles que rodean el área del proyecto	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
Calidad visual	Percepción visual del entorno que rodea al proyecto	Degradado Deficiente Mediocre Bueno Notable Muy bueno Excelente
Calidad del paisaje	Percepción visual de la calidad del paisaje	Degradado Deficiente Mediocre Bueno Notable Muy bueno Excelente
Diversidad de Especies	Diversidad entre los diferentes tipos de especies animales	Excepcional Alta Aceptable Baja Uniformidad paisajística
USO DEL SUELO		
Uso del suelo	Suma ponderada de la superficie de cada tipo de uso del suelo. Porcentaje de la superficie total	Nulo Compatible Moderado Severo Critico

POBLACION		
Población empleada	Por ciento de población empleada en el area del proyecto, dentro y fuera del mismo	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
Población afectada	Por ciento de población afectada por las labores del proyecto, de dentro y fuera y de este	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
INFRAESTRUCTURA		
Nivel de afectación por construcciones	Nivel de afectaciones por construcciones, suma ponderada de cada tipo de construcción expresada en porciento de población afectada	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
ECONOMIA		
Nivel de empleo	Por ciento de población empleada en el área del proyecto, dentro y fuera del mismo	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
Incremento de los ingresos	Diferencia relacionado con los históricos anuales	Nulo Compatible Moderado Severo Critico
GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA		
Erosión	Porciento del total del área del proyecto afectado	No erosionado Despreciable Moderada Extensiva

A3 Encuestas aplicadas a los expertos en Medio Ambiente

Encuesta 1: Variables para la valoración de la importancia del impacto. Acciones de un Proyecto Minero.

1. ¿Qué variables tiene Ud. En cuenta para la valoración de la importancia de los impactos ambientales?

Marque con una X las variables que Ud. utiliza. Evalúe la importancia que le concede a cada una de las variables seleccionadas, valores del 1 al 10.

Selección	Variable	Valoración
	Naturaleza del Impacto	5
	Extensión	6
	Intensidad	10
	Momento	5
	Persistencia	8
	Recuperabilidad	10
	Efecto	5
	Periodicidad	5
	Reversibilidad	5
	Sinergia	5
	Acumulación	4

- a) Proponga si deben considerarse otras variables

Variable	Valoración

2. ¿Cuáles considera Ud. son las fases y acciones que intervienen en un proyecto

minero? Marque su selección con una X.

	Fase de investigación y planificación
	Contratación del personal temporal
	Servicios topográficos
	Apertura de vías de acceso
	Instalación de campamentos
	Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica
	Perforación y recolección de testimonios
	Retiro de material para ensayos
	Realización de ensayos de laboratorio a escala-piloto
	Elaboración de proyecto de ingeniería
	Fase de implantación
	Contratación de servicios de terceros
	Encargue de máquinas y equipamientos
	Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso
	Implantación de cantero de obras
	Contratación de mano de obra para la construcción
	Trabajos topográficos
	Trabajos de perforación geológica
	Construcción de vías de acceso
	Remoción de la vegetación
	Desbroce y terraplenado
	Almacenaje del suelo vegetal
	Preparación de las áreas de disposición de estériles y relaves
	Instalación de línea de transmisión de energía eléctrica o instalación de grupo generador
	Implantación de sistema de captación y almacenamiento de agua
	Construcción y montaje de las instalaciones de manipulación y beneficio
	Construcción y montaje de las instalaciones de apoyo
	Disposición de residuos sólidos
	Implantación de vivero para mudas
	Contratación de la mano de obra para la fase de operación
	Fase de operación
	Remoción de vegetación
	Decapado del yacimiento
	Drenaje de la cantera y áreas operacionales
	Cargamento y transporte del mineral y estéril
	Disposición de estéril
	Disposición temporaria de suelo vegetal
	Extracción del mineral

	Almacenamiento del mineral
	Transporte de maquinarias y equipos
	Mantenimiento de caminos
	Trituración y clasificación
	Beneficio
	Secado de los productos
	Procesamiento metalúrgico
	Disposición de relaves
	Almacenamiento de los productos
	Expedición
	Transporte
	Almacenaje de insumos
	Disposición de residuos sólidos
	Mantenimiento
	Adquisición de bienes y servicios
	Fase de desactivación
	Rehabilitación de áreas minadas
	Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas
	Remoción de insumos y residuos
	Demolición de edificios

3. Proponga nuevas acciones y nuevas fases si lo considera necesario.

Encuesta #2: Factores Ambientales, Indicadores y Magnitud Ambiental.

1. ¿Qué factores ambientales tiene Ud. en cuenta para realizar las evaluaciones de impacto? Marque con una X los factores que Ud. utiliza. Evalúe la importancia que le concede a cada uno de los factores seleccionados, valores del 1 al 10.

Selección	Factor Ambiental	Valoración de Importancia
	Geología y Geomorfología	
	Suelo	
	Aguas	
	Clima	
	Aire	
	Flora y vegetación	
	Fauna	
	Paisaje	
	Uso del suelo	
	Población	
	Infraestructura	
	Economía	

a) Proponga si deben considerarse otros factores ambientales

Factor Ambiental	Valoración

2. Según los factores ambientales que considera deben tenerse en cuenta en las evaluaciones de impacto.

- a. ¿Qué indicadores ambientales cree que deben ser considerados por cada uno de ellos?
- b. Teniendo en cuenta los límites permisibles de estos indicadores ambientales, cómo determina el valor de la magnitud de un impacto ambiental.

(Las respuesta a estas interrogantes en la tabla que está a continuación)

Anexos

Factor Ambiental	Indicador para el Factor Ambiental	Limite Permisible	Valor de Magnitud
Geología y Geomorfología			
Suelo			
Aguas			
Clima			
Aire			
Flora y vegetación			
Fauna			
Paisaje			
Uso del suelo			
Población			
Infraestructura			
Economía			

3. Otros aspectos que cree que deben ser tomados en cuenta relacionados con los indicadores ambientales y la magnitud de un impacto.

Encuesta #3: Valoración de las variables que intervienen en el cálculo de la importancia.

1. ¿Cuál es el valor máximo que cree debe tener la variable Importancia?-
- __100__

Según este valor, ¿cómo lo distribuye por las variables que intervienen en el cálculo de la misma?

Variab les	Valor según Máximo de Importancia
Intensidad	
Extensión	
Momento	
Persistencia	
Reversibilidad	
Sinergismo	
Acumulación	
Relación causa-efecto	
Periodicidad	
Recuperabilidad	

2. ¿Que criterio tiene en consideración para determinar los valores de las variables que intervienen en el cálculo de la Importancia?

Variables	Criterios
INTENSIDAD Baja Media Alta Muy Alta Total	
EXTENSIÓN Puntual Parcial Extenso Total Crítico	
MOMENTO Largo Plazo Medio Plazo Inmediato Crítico	
PERSISTENCIA Fugaz Temporal Permanente	
REVERSIBILIDAD Corto Plazo Medio Plazo Irreversible	
SINERGISMO Sin sinergismo	

Sinérgico	
Muy Sinérgico	
ACUMULACIÓN	
Simple	
Acumulativo	
RELACIÓN CAUSA- EFECTO	
Indirecto (secundario)	
Directo (primario)	
PERIODICIDAD	
Irregular	
Periódico	
Continuo	
RECUPERABILIDAD	
De manera inmediata	
A medio plazo	
Mitigable	
Irrecuperable	

3. Otros aspectos que considere que deben ser tomados en cuenta para la valoración de las variables involucradas en la determinación de la importancia.

A4 Sistemas Basados en el Conocimiento

Los Sistemas Expertos (SE) constituyen ciertamente la aplicación más difundida de Sistemas Basados en Conocimiento. A partir de los años ´70, los Sistemas Expertos comenzaron a difundirse como una herramienta de software utilizable en dominios de aplicación restringido, tales como diagnóstico médico, detección de yacimientos minerales, etc.[IA]

La Inteligencia Artificial (IA) ha desarrollado distintos formalismos (basados en casos, basados en argumentos, basados en reglas de producción, etc.), que intentan capturar las pautas que guían el razonamiento de un agente inteligente. Estos formalismos permiten modelar los problemas del mundo real en términos precisos.

Para representar el conocimiento dentro de los Sistemas Expertos se utilizaron los sistemas de producción (también llamado Sistemas Basados en Reglas), a los cuales se le incorporó el manejo de la incertidumbre.

Los Sistemas Basados en el Conocimiento (S.B.C.) son un modelo computacional de más alto nivel que el paradigma de la programación convencional, estos sistemas están formados por tres componentes: la base de conocimiento (B.C.), la máquina de inferencia (M.I.) y la interfase con el usuario.

Sistema Experto=Base de Conocimiento+Máquina de Inferencia.

Sistema Experto.

Un Sistema Experto es una rama de la Inteligencia Artificial y es aquel que imita las actividades de un humano para resolver problemas de distinta índole. También se dice que un SE se basa en el conocimiento declarativo (hechos sobre objetos, situaciones) y en el conocimiento de control (información sobre el seguimiento de una acción).

Para que un SE sea herramienta efectiva, los usuarios deben interactuar de una forma fácil, reuniendo dos capacidades par poder cumplirlo:

1. Explicar sus razonamientos o base del conocimiento: los sistemas expertos se deben realizar siguiendo ciertas reglas o pasos comprensibles de manera que se pueda generar la explicación para cada uno de estas reglas, que a la vez se basan de hechos.

2. Adquisición de conocimiento: son mecanismos de razonamiento que sirven para modificar los conocimientos anteriores.

Estados en el desarrollo de un Sistema Experto.

En su desarrollo, el S.E. transita por cinco estados fundamentales:

- Prototipo demostrativo. El sistema resuelve una porción del problema (uno o dos casos) mientras que el enfoque es adecuado y el desarrollo del sistema es factible. La B.C. contiene entre 50 y 100 reglas. Se alcanza en tres meses.
- Prototipo de investigación. El sistema muestra resultados creíbles sobre todo el problema, pero no está totalmente probado y revisado. Su B.C. contiene entre 200 y 500 reglas y resuelve un gran número de casos. Requiere de uno a dos años de trabajo. La mayoría de los S.E. llegan hasta este estado.
- Prototipo de campo. El sistema muestra buenos resultados y ha sido completamente revisado en el medio de trabajo del usuario. Su B.C. contiene de 500 a 1000 reglas. Se alcanza a los dos o tres años de trabajo. Sólo algunos S.E. llegan a este estado.
- Modelo de producción. El sistema exhibe alta calidad, confiabilidad, rapidez y eficiencia en el medio de trabajo del usuario. Su B.C. contiene de 500 a 1500 reglas. Requiere de dos a cuatro años de labor. Pocos S.E. alcanzan este estado.
- Sistema comercial. El sistema se usa comercialmente. Este estado se alcanza al cabo de 5 ó 6 años de desarrollo.

Etapas del desarrollo de un S.E.

En la construcción de los S.E. es necesario seguir ciertos pasos en aras de lograr la eficiencia del aseguramiento programativo y una mayor agilidad en la confección del sistema en cuestión.

Estas etapas son:

I) Etapa de identificación.

En esta etapa se caracteriza el problema según sus aspectos más relevantes. Esto incluye las siguientes tareas:

a) Selección de los participantes y determinación del papel a desempeñar por cada uno de ellos. Antes del proceso de adquisición del conocimiento es necesario determinar quiénes van a participar en el mismo. Lo más usual es que sólo participe un experto y un I.C. No obstante, pudieran participar otros expertos en el tema y más de un I.C. Es necesario, por tanto, asignarle a cada uno de ellos la tarea que va a desempeñar, determinando, por supuesto, el experto y el I.C. jefes.

b) Identificación del problema. Esta tarea es desarrollada por el experto y el I.C de una manera conjunta.

c) Identificación de los recursos. Esta tarea consiste en identificar los recursos necesarios para adquirir el conocimiento e implementar y probar el sistema. Ejemplos de recursos típicos lo constituyen las fuentes del conocimiento, el tiempo necesario, el equipamiento computacional requerido, el costo del desarrollo del sistema, entre otros.

d) Identificación del objetivo. En esta tarea se identifican los objetivos de la construcción del S.E. Se hace de forma independiente a la identificación del problema, pues es útil separar los objetivos de las tareas específicas del problema a realizar.

II) Etapa de conceptualización.

En esta etapa se definen explícitamente los conceptos y relaciones claves identificados en la etapa anterior. Esta se desarrolla mediante interacciones constantes entre el experto y el I.C. y consume una gran cantidad de tiempo.

III) Etapa de formalización.

En esta etapa se crea una representación formal, basada en las herramientas de la Ingeniería del Conocimiento, de todas las características analizadas en la etapa anterior. En ella el I.C. desempeña un papel más activo, explicándole al experto los instrumentos existentes y la forma idónea para representar su problema. Como resultado de la misma se obtiene un conjunto de especificaciones parciales que describen cómo el problema puede representarse dentro de la herramienta seleccionada.

IV) Etapa de implementación.

El conocimiento formalizado en la etapa previa se lleva a la forma de representación escogida, quedando conformada la B.C. Se implementa además el M.S.P. seleccionado, especificando las estructuras de datos, las reglas de inferencia y los mecanismos de control, construyéndose un programa ejecutable. Como resultado de esta etapa se obtiene un prototipo del S.E., capaz de ser ejecutado y probado.

V) Etapa de prueba.

Se evalúa el prototipo usando dos o tres ejemplos. Cuando éste se ejecute correctamente con éstos, se debe probar con una variedad de casos, que incluyan tanto los más comunes como las más raros, para determinar las debilidades de la B.C.: si se hacen preguntas inadecuadas o ambiguas, si la entrada de los datos es poco amistosa, si las conclusiones son adecuadas, si la salida tiene un nivel de detalle apropiado, si no hay errores en el razonamiento, si no hay reglas incorrectas, incompletas o inconsistentes, si el mecanismo de control usado es adecuado, o sea, si se escogen primero las reglas deseadas, etc. La medición de los resultados de un S.E. es difícil porque no se sabe cómo cuantificar el uso del conocimiento. No se pueden presentar pruebas concluyentes formales de su corrección. Lo que se puede hacer es oponerlo a un experto humano en la solución de problemas reales.

VI) Revisión del prototipo.

Normalmente, el refinamiento del prototipo incluye el reciclaje a través de las

etapas de implementación y prueba para ajustar las reglas y las estructuras de control. Esta etapa debe conducir a que el razonamiento sea estable y el sistema eficiente. Aquellos aspectos que lo afecten deben ser modificados.

Estas etapas no son independientes y están muy relacionadas entre sí. Por ejemplo, fallas al implementar las reglas y el mecanismo de control en la etapa de implementación pueden ocasionar cambios en la etapa de formalización. Además, la última etapa puede ocasionar la revisión parcial de las etapas anteriores.

Razonamiento con incertidumbre.

El conocimiento es casi siempre incompleto e incierto. Para tratar el conocimiento incierto, una regla puede tener asociado a ella *un factor de certeza* o un peso. El conjunto de métodos para usar el conocimiento incierto conjuntamente con datos inciertos en el proceso del razonamiento se llama *razonamiento con incertidumbre*.

En las aplicaciones expertas de un sistema incierto o el conocimiento heurístico (como los seres humanos lo hacemos) su credibilidad está a menudo en duda. Cuando una respuesta a un problema es cuestionable, queremos saber el análisis razonado. Si el análisis razonado parece probable, tendremos que creer la respuesta. La mayoría de los SE tienen la capacidad de contestar a las preguntas de la forma: “porqué es la respuesta X?”. Las explicaciones pueden ser generadas rastreando la línea del razonamiento usada por el motor de inferencia.

Los enfoques existentes para representar la incertidumbre se dividen en dos categorías básicas:

- **Caracterizaciones numéricas:** Las representaciones numéricas son propias para representar y manipular la incertidumbre dada por la información imprecisa, pues ellas permiten trabajar con valores de confianza. Es posible, además, definir un cálculo que ofrece un mecanismo para propagar la incertidumbre a través del proceso de razonamiento. Sin embargo, la representación numérica no puede ofrecer una explicación clara de las razones

que conducen a una conclusión dada. Entre los enfoques numéricos están:

- Regla de Bayes.
 - Regla de Bayes modificada.
 - Teoría de la confirmación.
 - Teoría de Dempster-Shafer.
 - Razonamiento evidencial.
 - Espacio evidencia.
 - Teoría de la necesidad y la posibilidad.
 - Valores lingüísticos.
- **Caracterizaciones simbólicas:** Los modelos basados en este enfoque están, en su mayor parte, designados para manipular el aspecto de la incertidumbre derivado de la información incompleta, pues, al carecer de medidas para cuantificar los niveles de confianza, son inadecuados para manipular la información imprecisa y son más apropiados para permitir seguir la traza desde las fuentes de información a las conclusiones. Algunos de los enfoques simbólicos son:
 - Suposiciones razonadas.
 - Lógica no monotónica.
 - Circunscripción.
 - Enfoque monotónico.
 - Análisis Bayesiano.
 - Conjuntos difusos y/o Lógica difusa.
 - Teoría de Cohen.

En la vida no existe algo que sea ciento por ciento seguro. Todos los días nos encontramos con situaciones que implican tomar una decisión con información imprecisa. Tradicionalmente en los Sistemas Expertos basado en reglas el método que se ha utilizado para manejar estos problemas ha sido el modelo de Bayes. Buscando algunas alternativas que sobrepasaran las limitaciones mostradas por este método, se han creado otros modelos que tratan ciertos tipos de incertidumbre, cada uno de una manera diferente.

Sistema Experto Difuso.

Un Sistema Experto Difuso tiene la misma estructura que los SE no difusos. Su diferencia esta en el manejo de los datos una vez que estos se encuentran dentro del sistema. En los SE difusos se llevan a cabo 2 transformaciones nombradas Fusificación y Defusificación.

Fusificación de los datos.

Esta parte del Sistema es transparente al usuario que lo usa. Consiste fundamentalmente en transformar datos numéricos en etiquetas lingüísticas cuyo valor numérico es equivalente. Después de haber definido las variables lingüísticas se procede a conformar las reglas para mediante estas llegar al resultado esperado.

Debido a la propia naturaleza de las variables lingüísticas puede pasar que a un mismo valor numérico se le asocien más de una etiqueta lingüística. Para manejar este tipo de problemas cuando se conforma la regla se le asocia un Factor de Certeza, el cual si se omite es 1 por defecto.

Reglas de producción difusas

La representación del conocimiento formaliza y ordena el conocimiento. Una representación ampliamente usada es la regla de producción, o simplemente regla. Igual que en los SE no difusos las reglas se dividen en: una parte *SI*, y otra parte *ENTONCES* (comúnmente denominado como una condición y una acción). En estos sistemas es común que se definan varios tipos de reglas, todas basadas en la misma estructura *IF-THEN* como también se le llama.

Las reglas pueden clasificarse como:

- Reglas Simples.
 - Regla CRISP.
 - Regla FUZZY-CRISP.
 - Regla FUZZY_FUZZY.

- Reglas Compuestas.
 - Reglas con Múltiples Antecedentes.
 - Reglas con Múltiples Consecuentes.

Regla CRISP.

Las reglas que responden a esta clasificación tienen la forma: *si A entonces B*, donde A y B pueden ser variables, objetos o números.

Regla FUZZY-CRISP.

Estas tienen la forma: *si A entonces B*, donde A es una *variable lingüística* (ver apéndice A) y B puede ser una variable normal, objeto, etc.

Regla FUZZY_FUZZY.

En este caso ambos valores A y B son variables lingüísticas.

Reglas con Múltiples Antecedentes.

Tal y como su nombre lo indica esta regla esta compuesta por múltiples condiciones que se pueden representar como:

si A_1 and A_2 and... and A_n entonces B.

si A_1 or A_2 or... or A_n entonces B.

Donde las diferentes A_i e incluso B, pueden tomar cualquier valor, y ubicarse en una de las clasificaciones mencionadas anteriormente.

Reglas con Múltiples Consecuentes.

En este tipo de regla una condición desencadena un grupo de acciones. Tienen la forma *si A entonces B_1 and B_2 and... and B_n* igual que en el caso anterior la condición A y las acciones B_i se pueden ubicar en cualquier clasificación de reglas simples.

Defusificación.

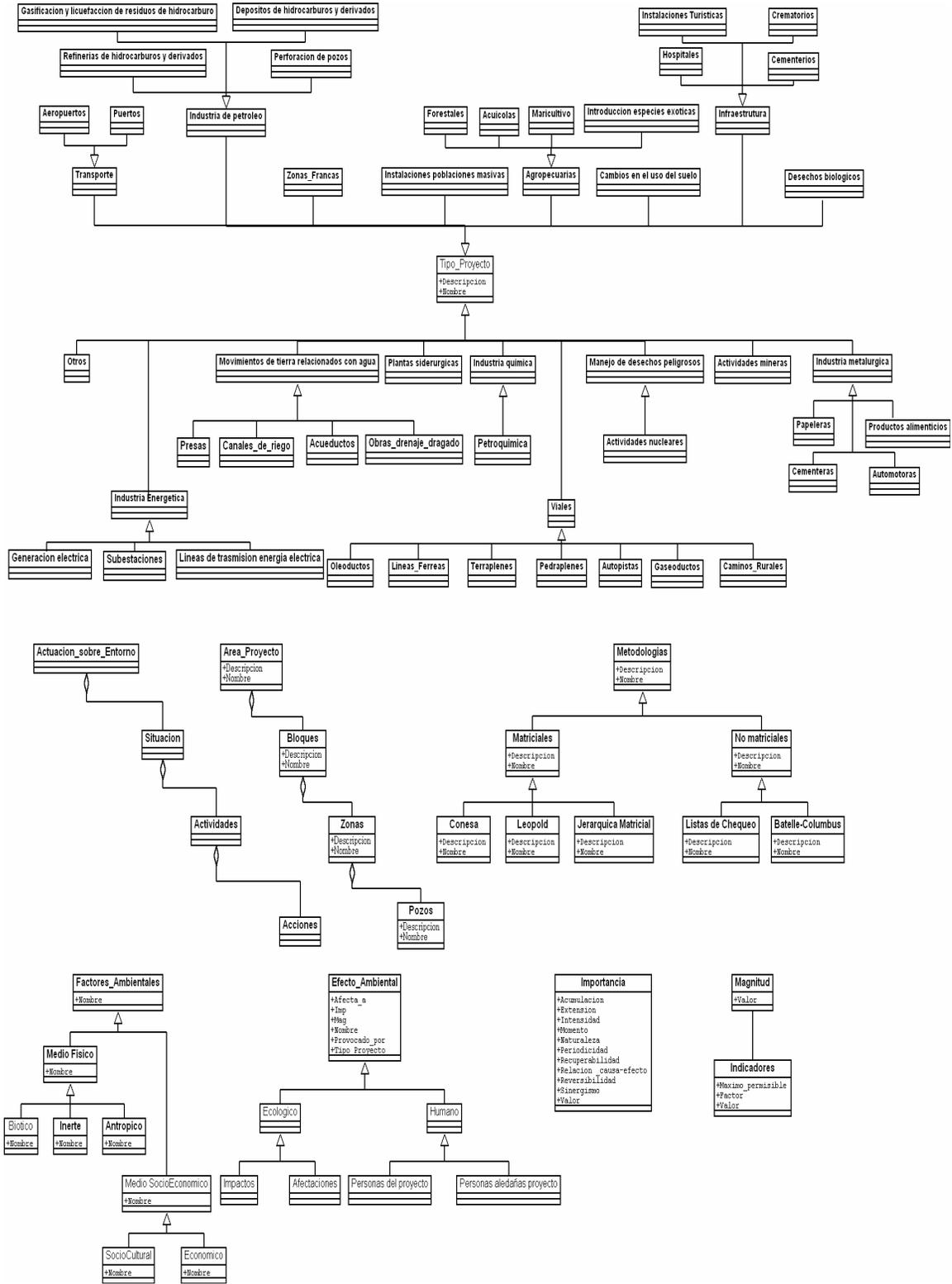
Este proceso consiste en transformar una variable lingüística en un valor numérico. Existen diversas alternativas para transformar un valor difuso en numérico (proceso que en inglés, defuzzification y en español, defusificación), las más empleadas son:

- Métodos de los Máximos: Se escoge el mayor valor del conjunto. Si se producen empates puede seleccionarse el primer valor encontrado o la media (en cuyo caso el método se denomina media de máximos).
- El centroide difuso (o centro de gravedad, COG en FuzzyCLIPS), definido como:

$$y_{\text{centroide}} = \frac{\sum_{x \in X} x \mu_A(x)}{\sum_{x \in X} \mu_A(x)}$$

Sobre la base de que la metodología matricial difusa manipula la incertidumbre propia de la información que brindan los expertos en medio ambiente empleando la teoría de conjuntos difusos, se escogió la misma para manejar la incertidumbre en el sistema desarrollado.

A5 Diseño de la Ontología de Evaluación de Impacto Ambiental



A6: Evaluación de Impacto Ambiental aplicada al caso de estudio. Comparación de resultados. Aplicación del Caso de Estudio con la Metodología

En este Anexo realizaremos una comparación de los resultados obtenidos en la Evaluación de Impacto Ambiental utilizando la Metodología Jerárquico- Matricial Difusa y la Metodología CRISP.

En este caso el proyecto a evaluar será una nueva zona que se pondrá en explotación, que es la Zona I del 2008, compuesta además por los bloques R-46, R-47, Q-47 y Q-47.

Los impactos que se han identificado son los que se muestran a continuación:

- I. Pérdida de la Materia Orgánica
- II. Aumento de los niveles de polvo sedimentable en el aire, producto a las labores de la minería.
- III. Incremento de los niveles de contaminación por gases de escape de los motores de combustión interna
- IV. Contaminación sónica
- V. Destrucción de la cubierta vegetal
- VI. Realización de inversiones
- VII. Compactación crítica de los suelos
- VIII. Aumento de las probabilidades de ocurrencia de procesos geomorfológicos degradantes (erosión)
- IX. Cambios en la composición físico-químicas de las aguas de escurrimiento superficial, debido a la contaminación por incremento de sólidos en suspensión

La estructura jerárquica para determinar efecto Ambiental Global del proyecto sería:

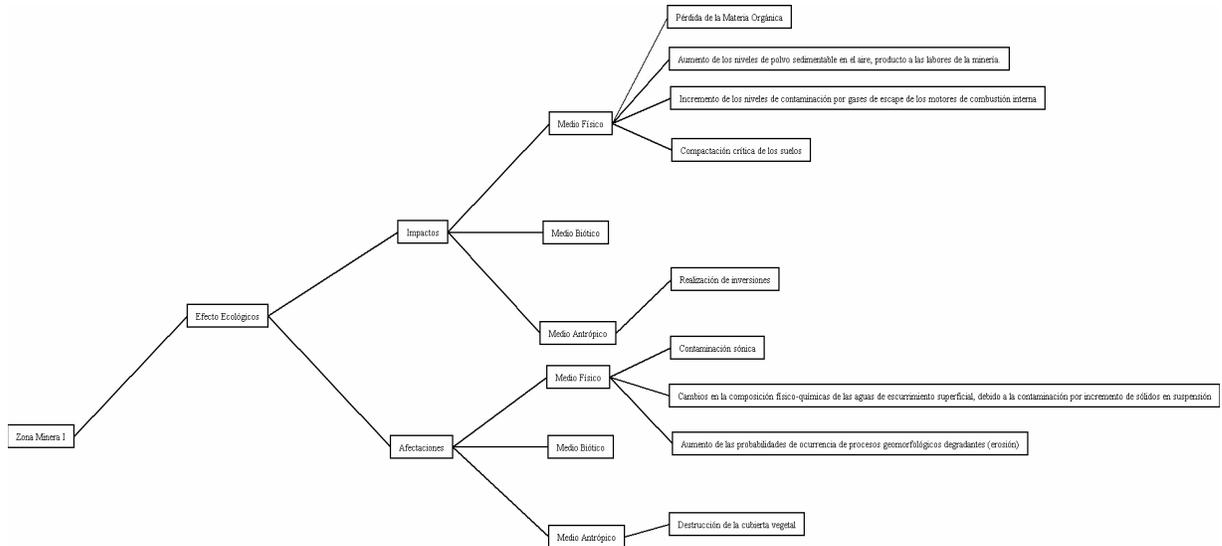


Figura 1: Estructura Jerárquica para el Efecto Ambiental Global.

Nombre del Impacto	Valor Importancia		Valor Magnitud		Valor Efecto Ambiental	
	Met. Conesa	Met. Jerárquica-Matricial	Met. Conesa	Met. Jerárquica-Matricial	Met. Conesa	Met. Jerárquica-Matricial
I.	Moderado	Moderado	Severo	Severo	-	Aceptable
II.	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	-	Aceptable
III.	Moderado	Moderado	Moderado	Aceptable	-	Aceptable
IV.	Moderado	Severo	Moderado	Moderado	-	Aceptable
V.	Severo	Crítico	Crítico	Crítico	-	Severo
VI.	Severo	Crítico	Moderado	Aceptable	-	Aceptable
VII.	Moderado	Severo	Crítico	Crítico	-	Moderado
VIII.	Severo	Severo	Moderado	Aceptable	-	Aceptable
IX.	Severo	Crítico	Crítico	Crítico	-	Severo

Tabla 1: Resultados de la evaluación parcial.

En la tabla 1 se exponen cada uno de los valores de la Importancia y Magnitud con cada una de las metodologías empleadas, en el caso del efecto ambiental solo se obtiene en la jerárquico-matricial.

Se puede observar como ciertos valores de los impactos identificados en la evaluación del proyecto, en este caso una zona del área total del proyecto, no coinciden con los resultados obtenidos por los expertos en las evaluaciones realizadas. Esto se debe, en primer lugar a que en la Metodología Jerárquica siempre se tiene en cuenta lo peor que puede pasar, un carácter pesimista, para que no pasen desapercibidas determinadas cuestiones en relación a un impacto en particular. Otro factor que influye en la modificación de estos resultados es que el grado de pertenencia al conjunto en que difieren los resultados, es de aproximadamente un 60 %, lo que indica que la Metodología Jerárquica modela la incertidumbre propia de la información ambiental obtenida. Se debe considerar que en el caso de la evaluación con la metodología desarrollada se determina el Efecto Ambiental Global, lo que con la metodología anterior se denomina Importancia Total del Proyecto.

Los resultados obtenidos por cada uno de los Medios serían:

Medio del entorno ambiental	Valor de Efecto Ambiental
Impactos Físico	Aceptable
Impactos Antropico	Aceptable
Afectaciones Físico	Moderado
Afectaciones Antropico	Severo

Tabla 2: Resultados de la evaluación por medios del entorno.

Por otra parte, los resultados para los impactos y las afectaciones serían Aceptable y Severo respectivamente.

El efecto ecológico sería Moderado, y finalmente el Efecto Ambiental Global del Proyecto sería Moderado. Este resultado coincide con el obtenido en la evaluación realizada con la metodología Crisp.

A diferencia de lo que podría realizarse con la evaluación que ya han realizado, podemos también evaluar la zona, a partir de las áreas que la conforman, según los pozos que ya han sido evaluados y de igual forma la afectación al medio sería Moderado.

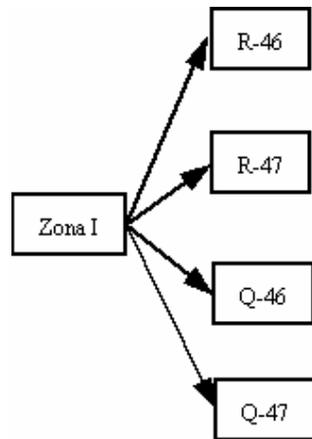


Figura 2: Estructura jerárquica correspondiente a Zona I.

Bloque	Efecto
R-46	Moderado
R-47	Severo
Q-46	Moderado
Q-47	Aceptable

Tabla 3: Resultados de la evaluación de la Zona I de 2008.