



UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. DE INGENIERÍA INFORMÁTICA Y TELECOMUNICACIONES

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Tesis Doctoral

Evaluación en el Tiempo del Impacto Ambiental con Técnicas Difusas. Aplicación en la Minería de Moa.

Yiezenia Rosario Ferrer

Directores:

Dr. Ignacio Requena Ramos

Dr. Oscar G. Duarte Velasco

Granada, Mayo de 2009

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Yiezenia Rosario Ferrer
D.L.: GR 2287-2009
ISBN: 978-84-692-3085-5

**EVALUACIÓN EN EL TIEMPO DEL IMPACTO AMBIENTAL CON
TÉCNICAS DIFUSAS. APLICACIÓN EN LA MINERÍA DE MOA.**

MEMORIA QUE PRESENTA LA LICENCIADA

YIEZENIA ROSARIO FERRER

PARA OPTAR POR EL GRADO DE DOCTOR EN INFORMÁTICA

DIRECTORES

DR. IGNACIO REQUENA RAMOS

DR. OSCAR G. DUARTE VELASCO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INTELIGENCIA
ARTIFICIAL

E.T.S. DE INGENIERÍA INFORMÁTICA Y TELECOMICACIONES

UNIVERSIDAD DE GRANADA

MAYO DE 2009

La memoria titulada **“Evaluación en el Tiempo del Impacto Ambiental con Técnicas Difusas. Aplicación en la Minería de Moa”**, que presenta D^a. Yiezenia Rosario Ferrer (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 de la Universidad de Granada, bajo la dirección de los Doctores D. Ignacio Requena Ramos y D. Oscar G. Duarte Velasco.

Granada, Mayo de 2009.

El doctorando



Fdo.: Yiezenia Rosario Ferrer

Los directores



Fdo.: Ignacio Requena Ramos



Fdo.: Oscar G. Duarte Velasco

Quiero agradecer:

A mis tutores Dr. Ignacio Requena Ramos y Dr. Oscar G. Duarte Velasco por su apoyo constante e incondicional en el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a los coordinadores de este programa doctoral, D^a. Rosa Isabel Urquiza Salgado y D. José Luis Verdegay, por todo el tiempo dedicado en llevar adelante este proyecto

A mis compañeros del Departamento de Informática del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa que asumieron mis funciones en los momentos que no he estado presente por encontrarme realizando actividades relacionadas con la tesis doctoral.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas, que más allá de este proyecto han contribuido en su realización.

Muchísimas gracias

A mis padres
A mi hermana
A mis amigos

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	3
1 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	11
1.1 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	17
1.2 METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	20
1.2.1 Valoración Cualitativa	21
1.2.2 Valoración Cuantitativa	27
1.3 TÉCNICAS DIFUSAS EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	30
1.3.1 Sistemas de Computación con Palabras	33
1.3.2 Metodología Difusa para la Evaluación de Impacto Ambiental (TDEIA)	35
1.4 SISTEMAS INFORMÁTICOS	43
1.4.1 TDEIA	44
2 TÉCNICAS DIFUSAS EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PARA ZONAS MINERAS	47
2.1 VALORACIÓN APROXIMADA	52
2.1.1 Descripción del proyecto	52
2.1.2 Identificación de los factores ambientales	58

2.1.3	<i>Identificación de los impactos ambientales</i>	60
2.1.4	<i>Determinación de la importancia del impacto</i>	62
2.2	VALORACIÓN DETALLADA	68
2.2.1	<i>Indicadores ambientales</i>	69
2.2.2	<i>Magnitud del impacto, Calidad Ambiental y Valor Ambiental</i>	73
2.3	MEDIDAS CORRECTORAS	74
2.4	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN EL YACIMIENTO MINERO PUNTA GORDA	77
2.4.1	<i>Valoración Aproximada</i>	78
2.4.2	<i>Valoración Detallada</i>	80
2.4.3	<i>Medidas correctoras</i>	84
3	EVALUACIÓN EN EL TIEMPO DEL IMPACTO AMBIENTAL	87
3.1	VALORACIÓN DEL TIEMPO EN LAS METODOLOGÍAS DE EIA TRADICIONALES	91
3.2	PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN EN EL TIEMPO DEL IMPACTO AMBIENTAL (EIA(T))	95
3.2.1	<i>Hitos del proyecto</i>	96
3.2.2	<i>Magnitud del impacto</i>	97
3.2.3	<i>Importancia del Impacto</i>	100
3.3	IMPORTANCIA ACUMULADA DEL IMPACTO	104
3.3.1	<i>Método simplificado para el cálculo de la importancia acumulada</i>	108
3.3.2	<i>Ejemplo del cálculo de la importancia utilizando el método simplificado</i>	109
3.4	METODOLOGÍA PARA EL SEGUIMIENTO EN EL TIEMPO DEL IMPACTO AMBIENTAL	115
4	SIAM: SISTEMA INFORMÁTICO DE APOYO A LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PARA PROYECTOS MINEROS	119
4.1	BASES DEL APOYO PARA LA EIA	122
4.2	DISEÑO DEL SISTEMA	124
4.2.1	<i>Módulo: Base de Conocimiento</i>	126
4.2.2	<i>Módulo: Identificación</i>	132
4.2.3	<i>Módulo: Valoración y Predicción</i>	133
4.2.4	<i>Módulo: Corrección</i>	134
4.2.5	<i>Herramientas utilizadas</i>	136
4.3	DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	137
4.3.1	<i>Pestaña: Identificación</i>	138
4.3.2	<i>Pestaña: Matriz de Impactos</i>	142
4.3.3	<i>Pestaña: Evaluación Temporal</i>	146
4.3.4	<i>Menú Configuración</i>	147

4.4	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL YACIMIENTO PUNTA GORDA	149
4.4.1	<i>Evaluación Inicial de Impacto Ambiental</i>	149
4.4.2	<i>Análisis global del impacto ambiental del proyecto</i>	163
4.4.3	<i>Selección de las medidas correctoras</i>	164
4.4.4	<i>Evaluación de la evolución en el tiempo del impacto ambiental</i>	169
4.4.5	<i>Resumen de los resultados obtenidos en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental</i>	171
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		175
TRABAJOS FUTUROS		180
PUBLICACIONES		181
BIBLIOGRAFÍA		183
ANEXOS		193
ANEXO I	PROCESAMIENTO DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS A LOS EXPERTOS AMBIENTALES	195
	<i>Encuesta: Variables para el Cálculo de la Importancia de los Impactos. Métodos para el Cálculo de la Importancia de los Impactos</i>	195
	<i>Encuesta: Acciones mineras</i>	197
	<i>Encuesta: Factores Ambientales</i>	204
ANEXO II	REVISIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS POR LOS EXPERTOS	206
ANEXO III	INDICADORES AMBIENTALES	210
1.	<i>Factor Ambiental: Geología y Geomorfología</i>	210
2.	<i>Factor Ambiental: Aire</i>	211
3.	<i>Factor Ambiental: Suelo</i>	213
4.	<i>Factor Ambiental: Agua</i>	216
5.	<i>Factor Ambiental: Clima</i>	219
6.	<i>Factor Ambiental: Flora y vegetación</i>	220
7.	<i>Factor Ambiental: Fauna</i>	222
8.	<i>Factor ambiental: Paisaje</i>	223
9.	<i>Factor Ambiental: Uso del suelo</i>	225
10.	<i>Factor ambiental: Infraestructura</i>	225
11.	<i>Factor Ambiental: Población</i>	227
12.	<i>Factor Ambiental: Economía</i>	229

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 Jerarquía de Identificación de los factores ambientales _____	22
Fig. 1.2 Identificación de las acciones del proyecto _____	23
Fig. 1.3 Sistema de Computación con Palabras basado en aritmética difusa. _____	34
Fig. 1.4 Razonamiento Inverso en un Sistema de Computación con Palabras _____	35
Fig. 1.5 Identificación de los factores ambientales _____	36
Fig. 1.6 Ventana Principal de TDEIA _____	44
Fig. 1.7 Cuadro de diálogo con información del número difuso _____	45
Fig. 1.8 Árbol de factores _____	46
Fig. 2.1 Jerarquía Acciones del Proyecto _____	57
Fig. 2.2 Jerarquía Factores Ambientales _____	60
Fig. 2.3 Representación gráfica de la variable importancia _____	65
Fig. 2.4 Funciones de Transformación de algunos indicadores ambientales: a) Superficie erosionada, b) Material particulado, c) Salud e higiene _____	82
Fig. 3.1 Impacto Ambiental. t_a : momento actual, t_0 : momento de inicio de la acción, t_i : momento de inicio del impacto, t_f : momento de finalización de la acción. Adaptado de Conesa, 1997. _____	92
Fig. 3.2 Variable Momento, a) Impacto de aparición inmediata, b) ilustración genérica para impactos de aparición a medio plazo y a largo plazo. _____	93
Fig. 3.3 Impacto temporal _____	93

Fig. 3.4 Periodicidad del impacto. a) impacto continuo, b) impacto discontinuo, c) impacto aperiódico, d) impacto periódico. _____	94
Fig. 3.5 Hitos del proyecto _____	96
Fig. 3.6 Funciones para la valoración en el tiempo del impacto ambiental, $via(t)$ y $\delta(t)$. _____	105
Fig. 3.7 Función difusa de variación del impacto ambiental en el tiempo, $IA(t)$. _____	105
Fig. 3.8 Representación de las áreas para el cálculo de la importancia acumulada _____	106
Fig. 3.9 Intensidad del impacto del proyecto _____	106
Fig. 3.10 Representación gráfica del cálculo de $IMPa_i$ _____	107
Fig. 3.11 Representación gráfica de la función $via(t)$ cuya forma tabular se muestra en la tabla 3.3 _____	109
Fig. 3.12 Función de variación del impacto ambiental en el tiempo, $via(t)$, para el Impacto 1 _____	112
Fig. 3.13 Función de variación del impacto ambiental en el tiempo, $via(t)$, para el Impacto 2 _____	113
Fig. 4.1 Tareas del sistema _____	124
Fig. 4.2 Arquitectura del sistema _____	125
Fig. 4.3 Modelo del dominio de las evaluaciones de impacto ambiental _____	126
Fig. 4.4 Proceso de Adquisición del Conocimiento _____	132
Fig. 4.5 Identificación: Pestaña Generalidades _____	139
Fig. 4.6 Identificación: Pestaña Acciones del Proyecto _____	140
Fig. 4.7 Identificación: Pestaña Descripción del Medio Ambiente _____	140
Fig. 4.8 Pantalla Impactos Ambientales _____	141
Fig. 4.9 Pantalla Valoración del Impacto Ambiental _____	142
Fig. 4.10 Pestaña Matriz de Impactos _____	143
Fig. 4.11 Valoración aproximada del impacto ambiental _____	145
Fig. 4.12 Valoración detallada del impacto ambiental _____	146
Fig. 4.13 Pestaña Evaluación Temporal _____	147
Fig. 4.14 Configuración de las variables lingüísticas. Pestaña General. _____	148
Fig. 4.15 Configuración de las variables lingüísticas. Pestaña Etiquetas. _____	148
Fig. 4.16 Configuración de la fórmula para el cálculo de la Importancia del Impacto _____	149
Fig. 4.17 Hitos del proyecto Yacimiento Punta Gorda _____	156
Fig. III.1 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Carácter del relieve</i> _____	210
Fig. III.2 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Superficie erosionada</i> _____	211
Fig. III.3 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Material particulado</i> _____	212
Fig. III.4 Función de transformación del indicador ambiental: Concentración de Monóxido de Carbono (CO) _____	212
Fig. III.5 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel de riudo</i> _____	213
Fig. III.6 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Espesor de la capa fértil</i> _____	214
Fig. III.7 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel de humedad</i> _____	215
Fig. III.8 Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel de compactación</i> _____	215

Fig. III.9	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Salinidad</i>	216
Fig. III.10	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Turbidez</i>	217
Fig. III.11	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Temperatura</i>	217
Fig. III.12	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel piezométrico</i>	218
Fig. III.13	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Red de drenaje afectada</i>	219
Fig. III.14	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Temperatura media</i>	219
Fig. III.15	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Diversidad</i>	220
Fig. III.16	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Especies amenazadas</i>	221
Fig. III.17	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Superficie cubierta</i>	221
Fig. III.18	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Cantidad de árboles observables</i>	222
Fig. III.19	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Movilidad de especies</i>	223
Fig. III.20	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Calidad Visual</i>	224
Fig. III.21	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Calidad del paisaje</i>	224
Fig. III.22	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Uso del suelo</i>	225
Fig. III.23	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Infraestructura eléctrica</i>	226
Fig. III.24	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel de afectación por construcciones</i>	227
Fig. III.25	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Salud e higiene</i>	228
Fig. III.26	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel de empleo</i>	228
Fig. III.27	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Incremento de los ingresos</i>	229
Fig. III.28	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Nivel de inversiones</i>	230
Fig. III.29	Función de transformación del indicador ambiental: <i>Valor del suelo</i>	230

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 Variables para la determinación de la importancia de los impactos _____	25
Cuadro 1.2 Entradas y Salidas válidas del bloque de Interpretación Lingüística. _____	34
Cuadro 2.1 Encuesta Acciones Mineras I _____	54
Cuadro 2.2 Encuesta Acciones Mineras II _____	56
Cuadro 2.3 Encuesta Factores Ambientales _____	59
Cuadro 2.4 Encuesta para identificar los métodos de cálculo de la importancia del impacto _____	64
Cuadro 2.5 Encuesta Identificación de las variables para el cálculo de la importancia del impacto _____	64
Cuadro 2.6 Encuesta Indicadores Ambientales _____	70
Cuadro 3.1 Ejemplo de asignación de las etiquetas de la variable lingüística Magnitud para el descriptor ambiental Material Particulado _____	98
Cuadro 4.1 Jerarquía Factor Ambiental _____	128
Cuadro 4.2 Ejemplos de instancias de la Base de Conocimientos _____	130
Cuadro 4.3 Posibles impactos ambientales que se provocarán con la ejecución del proyecto Yacimiento Punta Gorda _____	153

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Ejemplo de Factores Ambientales y Unidades de Importancia asignadas. Tomado de Conesa Fernández, 1997 [18]	22
Tabla 1.2 Matriz de Identificación de Impactos	24
Tabla 1.3 Valoración de las Variables para el Cálculo de la Importancia del Impacto (Tomado de [18])	25
Tabla 1.4 Funciones de agregación	28
Tabla 1.5 Indicadores Difusos para el Análisis Aproximado Global	39
Tabla 2.1 Definición de la importancia de las variables en términos lingüísticos.	66
Tabla 2.2 Preprocesamiento de la Importancia según la Naturaleza del Impacto	67
Tabla 2.3 Indicadores Difusos Globales	68
Tabla 2.4 Jerarquía de Factores Ambientales y unidades de importancia asignadas	78
Tabla 2.5 Acciones del proyecto	79
Tabla 2.6 Importancia de los impactos recibidos por los factores ambientales	81
Tabla 2.7 Indicadores Ambientales	83
Tabla 2.8 Valor del Impacto ambiental por factor ambiental	83
Tabla 3.1 Etiquetas para la valoración de la Magnitud	97
Tabla 3.2 Variables lingüísticas y sus etiquetas utilizadas para la valoración de la importancia del impacto ambiental	102
Tabla 3.3 Estimación de la función de variación del impacto del proyecto	108

Tabla 3.4 Resumen del Proceso de obtención de la Importancia Acumulada del Impacto _____	114
Tabla 3.5 Resumen de Resultados _____	115
Tabla 4.1 Escala de colores para clasificar la Importancia del Impacto _____	144
Tabla 4.2 Jerarquía de acciones del proyecto Yacimiento Punta Gorda _____	150
Tabla 4.3 Jerarquía de factores ambientales del proyecto Yacimiento Punta Gorda _____	152
Tabla 4.4 Matriz de identificación de impactos _____	155
Tabla 4.5 Importancia de los impactos recibidos por los factores ambientales _____	157
Tabla 4.6 Importancia de los impactos provocados por las acciones del proyecto _____	158
Tabla 4.7 Valor del Impacto ambiental por factor ambiental _____	159
Tabla 4.8 Variables lingüísticas para la estimación de la importancia del impacto predicho _____	160
Tabla 4.9 Valoración lingüística del impacto ambiental _____	161
Tabla 4.10 Valoración del impacto ambiental _____	161
Tabla 4.11 Valoración de los indicadores ambientales _____	162
Tabla 4.12 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto Predicho _____	163
Tabla 4.13 Resumen de los indicadores para la obtención de la Importancia Acumulada Predicha _____	164
Tabla 4.14 Valoración lingüística de las medidas correctoras _____	168
Tabla 4.15 Valoración de los Indicadores Ambientales _____	168
Tabla 4.16 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto de las Medidas Correctoras _____	169
Tabla 4.17 Valoración lingüística del impacto provocado _____	169
Tabla 4.18 Valoración de los Indicadores Ambientales _____	170
Tabla 4.19 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto Calculado para el Hito 1 _____	171
Tabla 4.20 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto Total _____	172
Tabla 4.21 Resumen de los indicadores para la obtención de la Importancia del Impacto Global _____	173

Introducción.

Motivación y Objetivos

Las evaluaciones de impacto ambiental surgen con el fin de minimizar los efectos que la actividad humana produce sobre el entorno, tanto natural como humano, y corregirlos en la medida de lo posible. Este proceso es realizado previo a la ejecución de muchas actividades consideradas potencialmente agresivas. Para ello se realiza un estudio del impacto que dichas actividades producirían sobre el Medio Ambiente, teniendo como objetivo último, mantener un equilibrio entre la necesaria conservación del entorno natural y el también necesario desarrollo de la ciencia, la tecnología, la economía, la industria, entre otros.

El impacto ambiental se produce si una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el Medio Ambiente o en alguno de sus componentes. Esta acción puede ser un proyecto de ingeniería, una actividad industrial, un programa, un plan, una ley o disposición administrativa con implicaciones ambientales.

La dimensión ambiental para estas evaluaciones, debe ser analizada en un sentido amplio; tanto en sus aspectos naturales (como el suelo, la flora, la fauna) como de contaminación (aire, agua, suelo, residuos), de valor paisajístico, de alteración de costumbres humanas y de impactos sobre la salud de las personas.

Una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un proceso jurídico-administrativo que permite identificar, predecir e interpretar los impactos ambientales que un proyecto o actividad produciría en el medio ambiente si es ejecutado, y adicionalmente, permite considerar medidas para la prevención y corrección de estos efectos impactantes [18].

Las evaluaciones de impacto ambiental constituyen instrumentos preventivos de gestión ambiental, que permiten que las políticas ambientales puedan ser cumplidas, y más aún, que se incorporen tempranamente al proceso de desarrollo y toma de decisiones.

Hasta la actualidad, han sido numerosas las técnicas y metodologías que se han desarrollado para evaluar los impactos ambientales ([13], [14], [18], [37], [45], [59], [60]), de una forma sistemática, y contando con la opinión de expertos en diferentes áreas que colaboran en el estudio.

En los últimos años, se han incorporado a las metodologías de evaluación del impacto ambiental, técnicas para manejar la información difusa ([20], [26], [52], [87]), toda vez que gran parte de los conceptos e información que se manejan en un estudio de impacto ambiental son inherentemente difusos, de acuerdo con su carácter impreciso o incierto. Los juicios de valor, especialmente en su forma lingüística, son un ejemplo claro de información vaga. Por ejemplo, la afirmación “la calidad del agua es buena” puede ser interpretada de manera diferente por diferentes individuos, lo que para uno es considerado como adecuado, para otro puede tener otro significado.

Las metodologías que utilizan técnicas difusas, parten de las metodologías clásicas citadas anteriormente ([19], [21], [23], [40], [80]) y constituyen una extensión de ellas.

Han sido diseñadas metodologías y métodos difusos para la evaluación de impacto ambiental para obras de ingeniería civil [21], para evaluar el impacto de los pesticidas en la agricultura ([35], [85]), para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas [81], para el diagnóstico ambiental en vertederos y escombreras [19], entre otros.

A partir de la valoración de los beneficios de la aplicación de técnicas difusas en los métodos de evaluación de impacto ambiental, y teniendo en cuenta que la actividad económica fundamental de la zona de Moa (Cuba) es la minería, una de las actividades que produce afectaciones importantes sobre el entorno ([1], [2], [4]), surge la oportunidad de incorporar técnicas difusas a la evaluación de impacto ambiental de proyectos mineros en general, y en la minería de Moa en particular.

Los proyectos mineros duran gran cantidad de años, por lo que es necesario realizar controles periódicos del estado del Medio Ambiente. Resultaría interesante incorporar aspectos relativos al transcurso del tiempo que permitan realizar un seguimiento de la evolución del entorno del emplazamiento del proyecto. Es importante señalar que durante la ejecución de este tipo de proyecto, las características del medio ambiente cambian, es decir, el

emplazamiento del proyecto y sus alrededores transitan por distintas condiciones o estados y en consecuencia, la manifestación de los impactos ambientales varía con el paso del tiempo.

La incorporación de aspectos relacionados con la periodicidad de las evaluaciones permitirá la predicción del cambio de los impactos ambientales en el tiempo y la realización de diagnósticos ambientales. Esto tiene la finalidad expresa de conocer el estado del Medio Ambiente en momentos futuros, comprobar la efectividad de las medidas correctoras y valorar la necesidad de realizar cambios al proyecto, en determinados momentos prefijados del desarrollo de la actividad, teniendo en cuenta, como es habitual, la situación prevista anteriormente, la situación real en el momento actual, y el efecto debido a las medidas correctoras.

En esta idea, los objetivos generales de la memoria son:

- Aplicar técnicas difusas en la evaluación de impacto ambiental para proyectos de minería
- Introducir elementos relativos al transcurso del tiempo en la evaluación de impacto ambiental de proyectos mineros.

En el primer objetivo, será necesario analizar si la especificidad de la actividad minera permite la incorporación de técnicas difusas, y si como es previsible se puede realizar, se va a desarrollar una metodología (incorporando técnicas difusas) para la EIA en minería, y se aplicará en las explotaciones mineras de Moa.

Para el segundo objetivo, será necesario considerar momentos prefijados (hitos) del desarrollo de la actividad, como base del estudio en el tiempo. Se pretende diferenciar la contribución de cada variable que interviene en el cálculo de los impactos, según el punto de vista que sea, el momento o hito previo (previsión), el momento actual (situación real), o las medidas correctoras (corrección), y agregar los tres efectos para obtener un efecto global como medida de los impactos.

Para facilitar el manejo de la información difusa, y los cálculos necesarios, se pretende implementar el proceso en un software, y aplicarlo en la minería de Moa, como caso de estudio concreto.

Entonces, para facilitar la tarea de alcanzar los objetivos planteados, y de acuerdo con lo señalado más arriba, los objetivos globales se dividen en los siguientes objetivos específicos, más concretos:

- Analizar la posibilidad de incorporar técnicas difusas a la evaluación del impacto ambiental en minería en general, y en la actividad minera de Moa (Cuba) en particular.
- Desarrollo de una metodología difusa para la evaluación de impacto ambiental en proyectos mineros, y su aplicación a la Evaluación del Impacto Ambiental realizada en la actividad minera de Moa.
- Incorporación de aspectos relativos al tiempo a la metodología difusa de evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros, teniendo en cuenta como aspectos diferenciadores, para cada momento, los efectos previstos en el momento anterior, la situación real, y los efectos aportados por las medidas correctoras.
- Implementación de un sistema informático (software) que incorpore las conclusiones de los apartados anteriores.
- Ejemplificar la utilización de la metodología desarrollada, y el software implementado, en la minería de Moa.

De acuerdo con los objetivos planteados, la estructura de la presente memoria es la siguiente:

En el capítulo 1, se presentan la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y se resumen algunas de las metodologías desarrolladas, ya conocidas; además, se describe la metodología general de EIA utilizada como base para el desarrollo de esta investigación. Además, se presenta la utilización de técnicas difusas en la EIA, y se describe la metodología y el software desarrollado en [21] utilizando estas técnicas.

En el capítulo 2, se describe la incorporación de técnicas difusas a la evaluación de impacto ambiental de proyectos mineros. Se describe la metodología difusa desarrollada para la minería en Moa y se muestra un ejemplo de su aplicación concreta.

En el capítulo 3, se describe la incorporación de aspectos relativos al tiempo a la evaluación difusa de impacto ambiental. Se pone de manifiesto la agregación de los efectos debidos a las variables que mejor se pueden conocer, según el momento o situación en que se utilice (predicción, realidad, corrección)

En el capítulo 4 se describe el software que implementa la metodología de evaluación de impacto ambiental desarrollada y se muestra un ejemplo de la utilización de la misma en la minería de Moa.

A continuación se incluyen las conclusiones y las líneas que quedan abiertas para un trabajo futuro. Finalmente, se relacionan las referencias bibliográficas utilizadas en el desarrollo de la memoria.

Adicionalmente se incorporan los anexos, que contienen: el procesamiento de las encuestas realizadas a los expertos ambientales, los indicadores ambientales y sus funciones de transformación, y una revisión por los expertos ambientales del software presentado.

Capítulo 1

*Evaluación de Impacto
Ambiental*

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un proceso jurídico-administrativo que tiene por objetivo la identificación, predicción e interpretación de los impactos ambientales que un proyecto o actividad produciría en caso de ser ejecutado, así como la prevención, corrección y valoración de los mismos, todo ello con el fin de ser aceptado, modificado o rechazado por parte de las distintas Administraciones Públicas competentes [18].

Se dice que hay impacto ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en algunos de sus componentes. Esta acción puede ser de un proyecto de ingeniería, un programa, un plan, una ley o disposición administrativa con implicaciones ambientales.

Las Evaluaciones de Impacto Ambiental permiten establecer si una actividad industrial o empresarial es compatible o no con el medio natural, y por lo tanto se decide si debe ser ejecutada o no; así como en caso de ser aceptada, las condiciones que deben seguirse en su ejecución.

Las Evaluaciones de Impacto Ambiental pretenden establecer un equilibrio entre el desarrollo de la actividad humana y el Medio Ambiente, sin pretender ser un obstáculo al desarrollo, sino un elemento operativo para impedir el deterioro irreparable del medio natural.

Las Evaluaciones de Impacto Ambiental están reguladas en Cuba desde el punto de vista legal por la Ley 81 del Medio Ambiente de julio de 1997 [43]. Esta legislación establece en su artículo 13 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.

En la citada ley, se define la Evaluación de Impacto Ambiental como el procedimiento que tiene por objeto evitar o mitigar la generación de efectos ambientales indeseables, que serían la consecuencia de planes, programas y proyectos de obras o actividades, mediante la estimación previa de las modificaciones del ambiente que traerían consigo tales obras o actividades y, según proceda, la denegación de la licencia necesaria para realizarlos o su concesión bajo ciertas condiciones. Incluye una información detallada sobre el sistema de monitoreo y control para asegurar su cumplimiento y las medidas de mitigación que deben ser consideradas (ver [6], [16], [17] para más detalles).

Por otro lado, la Ley 76 de Minas de enero de 1995 [42], de Cuba, establece en sus artículos 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.

El proceso de EIA consta de tres etapas fundamentales: Identificación del Proyecto, Valoración Cualitativa, Valoración Cuantitativa, y al final, se emiten los informes del proceso; cada una de estas etapas se divide en fases de trabajo ([13], [18], [30], [32], [37], [40], [45], [59]). A continuación se exponen sucintamente las características de estas etapas y fases de trabajo.

1. Identificación del Proyecto

- i. Análisis del proyecto y sus alternativas, con el objetivo de conocer el proyecto a profundidad, se estudian sus objetivos, su alcance y duración, así como los detalles que puedan resultar de utilidad para identificarlo.
- ii. Definición del entorno del proyecto. Se delimita espacialmente la

porción del medio ambiente afectada por el proyecto. Esto se hace para cada factor por separado, pues es difícil para el conjunto de los factores ambientales.

- iii. Previsiones de los efectos. Se realiza una primera aproximación a los efectos del proyecto sobre el medio sin entrar a detallarlos.

2. Valoración Cualitativa

- i. Identificación de las Acciones. Se desglosa el proyecto para encontrar cuales son las actividades del proyecto potencialmente impactantes.
- ii. Identificación de los factores ambientales. Se obtiene un modelo simplificado del entorno como un conjunto de factores ambientales fácilmente analizables.
- iii. Identificación de los impactos. En esta etapa se identifican los posibles efectos que las acciones pueden provocar en los distintos factores ambientales; se elabora la Matriz de Importancia y se realiza la Valoración Cualitativa de los impactos.

3. Valoración Cuantitativa

- i. Predicción de la magnitud del impacto. 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.
- ii. Valoración cuantitativa del impacto. Es un proceso mediante el que se estima cuanto varía la Calidad Ambiental del entorno y por tanto cuál es el valor del impacto total producido por el proyecto; esto se hace teniendo como base los datos obtenidos en la valoración cuantitativa.
- iii. Definición de las medidas correctoras. Estas medidas buscan disminuir el impacto del proyecto. En esta etapa se define también el Programa de Vigilancia Ambiental que deberá ejecutarse durante todas las etapas del proyecto.

4. Emisión de Informes

- i. Proceso de participación pública: Si se dispone de un mecanismo de control social sobre el proceso de EIA, se reflejará la participación

ciudadana.

- ii. En la emisión del informe final, se recopilan todos los análisis de las fases anteriores.
- iii. Declaración de impacto ambiental, donde se refleja la decisión de la administración pública sobre la autorización o no de ejecutar el proyecto.

Las tres primeras etapas corresponden al Estudio de Impacto Ambiental. El conjunto de las cuatro etapas nos conduce a la EIA Detallada; si se obvia la Valoración Cuantitativa, nos encontramos ante la EIA Simplificada.

Sin embargo, el término “Evaluación de Impacto Ambiental” también se emplea para designar el estudio de los impactos que ocurrieron, o están ocurriendo, como consecuencia del emprendimiento de un conjunto de acciones humanas. Por lo que el término Evaluación de Impacto Ambiental puede ser utilizado en las siguientes situaciones:

- Previsión de los impactos potenciales que un determinado proyecto de ingeniería podría causar, en caso de ser implantado;
- Estudio de las alteraciones ambientales ocurridas en una determinada región como consecuencia de una actividad individual, o de una serie de actividades humanas, pasadas o presentes; es también llamada evaluación del daño ambiental,
- Análisis de los impactos ambientales, resultantes del proceso de producción, de la utilización y desperdicio de un determinado producto; esta forma particular también se conoce como análisis del ciclo de vida.

Finalmente, en caso de que la obra sea implantada, la evaluación del impacto ambiental continúa, a través de la aplicación de medidas de gestión preconizadas en el estudio de impacto ambiental, mediante el monitoreo de los impactos reales causados por la actividad, no tanto como ejercicio de previsión de las consecuencias futuras, sino a través de la comparación entre la situación posterior a la implantación de la obra y la situación anterior.

1.1 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Existen diferentes métodos, metodologías y procedimientos para evaluar los impactos ambientales, ya sea para evaluar el estado del Medio Ambiente en general o para evaluar específicamente alguno de sus factores.

Los métodos más usados son en su mayoría los más sencillos; entre ellos se pueden citar analogías, listas de chequeo, opiniones de expertos, etc. Las metodologías de EIA pueden, igualmente, no tener aplicabilidad uniforme en todos los países debido a las diferencias en sus legislaturas, estándares ambientales y programas de administración ambientales.

Las características deseables en las metodologías que se adopten para la evaluación del impacto ambiental, comprenden los siguientes aspectos [40]:

1. Deben ser adecuados para las tareas de identificación de impactos y comparación de opciones.
2. Ser lo suficientemente independiente de los puntos de vista del personal del equipo evaluador.
3. Ser económicos en términos de costes, requerimientos de datos, tiempo de aplicación, etc.

A continuación se presentan brevemente algunas de las metodologías de evaluación de impacto ambiental más utilizadas.

- Listas de Chequeo ([14], [18], [40])

Es un método muy simple, por lo que es de uso frecuente. Se utiliza normalmente para una evaluación preliminar o para llamar la atención sobre impactos importantes.

Hay muchas variedades de listas de chequeo. Típicamente, la lista de chequeo contiene una serie de puntos, asuntos de impacto o cuestiones que el usuario atenderá o contestará como parte del estudio de impacto. Tales listas de chequeo representan recordatorios útiles para identificar impactos y proporcionar una base sistemática y reproducible para el proceso de EIA. Pueden clasificarse en cuatro tipos:

- Simples: Analizan factores o parámetros sin ser estos valorados o interpretados.
- Descriptivas: Analizan factores o parámetros y presentan la información referida a los efectos sobre el medio.

- De verificación y escala: Incluyen, además de lo anterior, una escala de carácter subjetivo para la valoración de los efectos ambientales.
 - De verificación, escala y ponderación: Añaden a las anteriores unas relaciones de ponderación de factores en la escala de valoración.
- Métodos Matriciales ([14], [18])

Los métodos matriciales son técnicas bidimensionales que relacionan acciones con factores ambientales; y son básicamente de identificación. Los métodos matriciales, también denominados matrices interactivas causa-efecto, fueron los primeros en ser desarrollados para la EIA. La modalidad más simple de estas matrices muestra las acciones del proyecto en un eje y los factores del medio a lo largo del otro.

Cuando se prevé que una actividad va a incidir en un factor ambiental, éste se señala en la celda de cruce, describiéndose en términos de su magnitud e importancia [13]. Representan métodos ampliamente usados en los procesos de EIA, puesto que han sido diseñados para ser aplicados a cualquier tipo de proyectos, por lo que son muy populares. Existen diversas metodologías de EIA que tienen como base las matrices de interacción, entre los que podemos citar:

- La Matriz de Leopold [53], desarrollada en 1971 para el Servicio Geológico del Ministerio del Interior en Estados Unidos. Inicialmente fue diseñada para evaluar los impactos asociados a proyectos mineros y posteriormente ha resultado útil en proyectos de construcción de obras. Se desarrolla una matriz con el objetivo de establecer las relaciones causa-efecto de acuerdo con las características particulares de cada proyecto. El principio básico del método consiste, inicialmente, en señalar todas las posibles interacciones entre las acciones y los factores, para luego establecer, en una escala que varía de 1 a 10, la Magnitud e Importancia de cada impacto identificando si éste es positivo o negativo. El análisis del proyecto total se hace mediante sumas por filas y por columnas; también se suele multiplicar la Magnitud de cada impacto por su Importancia antes de efectuar las sumas.
- Método de Batelle-Colombus [70], elaborado para la planificación y gestión de recursos hídricos en Estados Unidos. Se puede usar con dos fines: a) medir el impacto ambiental sobre el medio de diferentes proyectos; b) planificar a medio y largo plazo proyectos con el mínimo de impacto ambiental posible. Se basa en

una lista jerárquica de parámetros o factores ambientales, que representan aspectos del medio ambiente que merecen considerarse por separado y cuya evaluación es representativa del impacto ambiental derivado de las acciones o proyectos. Es considerada una *metodología cuantitativa*, porque emplea indicadores ambientales y funciones de transformación para estimar la Calidad Ambiental. El análisis global del proyecto se realiza mediante la suma ponderada de la Calidad Neta de cada factor.

- Matrices escalonadas [18], en esta metodología se emplea un paso adicional para la identificación de los impactos indirectos. Primeramente se señalan los impactos directos y se enumeran consecutivamente. Luego se diseña una segunda matriz, en la que las acciones se sustituyen por los efectos directos identificados en el paso anterior, en esta matriz se señalan los efectos indirectos o secundarios. Este proceso puede repetirse sucesivamente para obtener impactos de orden superior. Una vez identificados todos los impactos se consignan en una matriz y se analizan con la metodología que se desee. Diversas metodologías usan este tipo de matrices (Gómez Orea [45], Departamento de Desarrollo y Planificación Regional del Estado de Nueva York [18]).
- Metodología de Conesa [18], es la utilizada como referencia en esta memoria, por lo que sus características generales se muestran en el apartado siguiente.
- Métodos de indicadores ([14], [40])

Se utilizan para valorar características específicas o integradas de factores medioambientales o recursos, como medio para describir los ambientes afectados, así como la predicción y evaluación de impactos. Los índices numéricos o descriptivos se han desarrollado como una medida de la vulnerabilidad del Medio Ambiente y los recursos a la contaminación u otras acciones humanas y han probado su utilidad en la comparación de localizaciones para una actividad propuesta. Sobre estas bases, pueden formularse las medidas para minimizar los impactos ambientales e incluir controles. Ejemplos de métodos de indicadores son los siguientes:

- Método de Holmes [49]
- Método de la Universidad de Georgia [71]
- Método de Hill-Schechter [48]
- Método de Fisher-Davis [36]

- Procesos de Monitorización [14] [40]

Se refieren a mediciones sistemáticas para establecer las condiciones existentes de los ambientes afectados así como dotar de una base inicial de datos para interpretar la importancia de cambios anticipados de un proyecto propuesto.

Para seleccionar una metodología, se recomienda tener en cuenta algunas características importantes como, si da una visión global, si es selectiva, mutuamente excluyente, si considera la incertidumbre, si es objetiva e interactiva.

Se presenta a continuación, una Metodología General, que servirá de base para las propuestas que se hacen en esta memoria.

1.2 METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

El Estudio de Impacto Ambiental (EsIA), es la descripción pormenorizada de las características de un proyecto de obra o actividad que se pretende llevar a cabo, incluyendo su tecnología, que se presenta para su aprobación en el marco del proceso de evaluación de impacto ambiental. Debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación del impacto ambiental del proyecto y describir las acciones que se ejecutarán para impedir o minimizar los efectos adversos, así como el programa de monitoreo que se adoptará [18].

El EsIA constituye un elemento analítico que interviene de manera esencial en cuanto a dar información en el procedimiento administrativo que es la EIA, y que culmina con la Declaración de Impacto Ambiental, la cual debe presentar la “realidad objetiva, para conocer en qué medida repercutirá sobre el entorno la puesta en marcha de un proyecto, obra o actividad” [18]. Además es un proceso complejo, puesto que es realizado por un equipo interdisciplinario, por lo que hay que homogeneizar las predicciones de cada uno de los miembros del equipo, así como la dificultad que representa predecir el efecto conjunto del proyecto sobre el Medio Ambiente, a partir de efectos parciales difíciles de predecir y debe realizarse de forma científicamente válida ([7], [8]).

La Metodología General consta de dos grandes fases, la Valoración Cualitativa y la Valoración Cuantitativa.

1.2.1 Valoración Cualitativa

En la fase de valoración cualitativa se busca obtener una estimación de los posibles efectos que provocará en el entorno la realización del proyecto mediante una descripción lingüística de sus propiedades. Los distintos expertos clasifican ciertas variables con etiquetas tales como baja, media, etc. para obtener un conocimiento cualitativo del impacto ambiental.

La metodología puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Describir el medio como un conjunto de factores ambientales afectados por el proyecto o actividad en estudio.
2. Describir el proyecto o actividad evaluada como un conjunto de acciones básicas, perfectamente caracterizadas.
3. Identificar los impactos que cada acción definida tiene sobre cada factor ambiental identificado.
4. Caracterizar cada impacto mediante la estimación de su importancia.
5. Analizar la importancia global de la actividad sobre el medio, a partir de las importancias caracterizadas anteriormente.

Identificación de los factores ambientales.

El entorno se conforma por un conjunto de elementos interrelacionados, su estudio como un todo resulta muy complejo, por lo que es necesaria una modelación simplificada. Por esta razón se divide en *Sistemas Ambientales*, estos su vez en *Subsistemas Ambientales*, los cuales se dividen en *Componentes Ambientales*, que finalmente se dividen en *Factores Ambientales* (figura 1.1). Según sea el proyecto, esta división puede simplificarse, reduciendo los niveles de división.

A cada factor medioambiental se asigna su medida de importancia relativa al entorno, medida en unidades de importancia (UIP), la cual se utiliza para efectuar ponderaciones en las estimaciones globales de los impactos. En la determinación de los factores ambientales, y de la importancia asignada a cada uno, deben tenerse en cuenta ciertos criterios básicos:

- Los factores deben ser representativos del entorno, relevantes, excluyentes entre sí, y exhaustivos.
- Los factores deben ser fácilmente identificables, y fácilmente cuantificables.

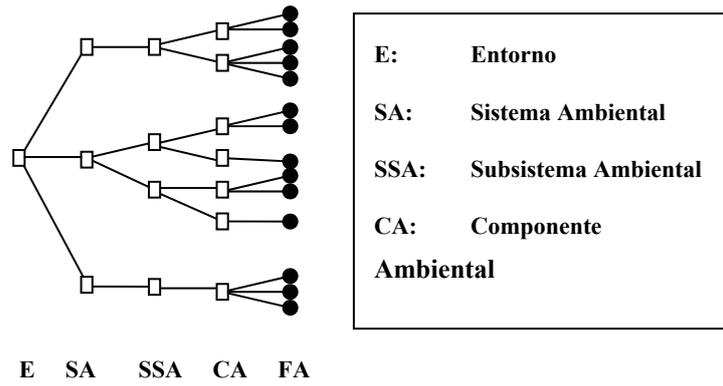


Fig. 1.1 Jerarquía de Identificación de los factores ambientales

En la tabla 1.1 se muestra un ejemplo de clasificación del entorno hasta el nivel de componentes ambientales.

Tabla 1.1 Ejemplo de Factores Ambientales y Unidades de Importancia asignadas (Tomado de [18])

Sistema Subsistema Componente	UIP (Total = 1000)
Medio Físico	650
<i>Medio Inerte</i>	350
Aire	125
Tierra y Suelo	100
Agua	125
<i>Medio Biótico</i>	225
Flora	100
Fauna	125
<i>Medio Perceptual</i>	75
Unidades de Paisaje	75
Medio Socioeconómico	350
<i>Medio Sociocultural</i>	250
Usos del territorio	75
Cultural	50
Infraestructuras	50
Humanos y estéticos	75
<i>Medio Económico</i>	100
Economía	50
Población	50

Las UIP que se asignan a cada factor permitirán realizar ponderaciones de los efectos globales; para facilitar esta tarea, así como para facilitar la interpretación de las UIP, se establece la condición de que la suma de las importancias de los factores debe ser 1000.

Identificación de las acciones del proyecto

El proyecto que se está evaluando se modela como un conjunto de *Acciones*, que pueden agruparse en *Actividades*, y estas a su vez en *Situaciones*. Muchas veces se desea confrontar varias opciones del mismo proyecto, con el fin de seleccionar aquella de menor impacto al medio; es usual agrupar cada opción como una situación y realizar las comparaciones, para determinar el impacto real de la ejecución proyecto (figura 1.2). Teniendo en cuenta las características del proyecto, pueden ser reducidos los niveles de división.

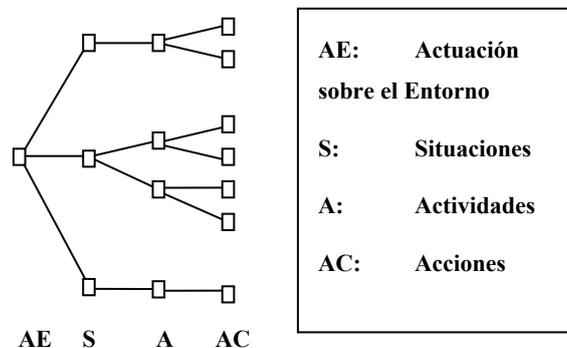


Fig. 1.2 Identificación de las acciones del proyecto

Identificación de los efectos de las acciones del proyecto sobre los factores

Una vez determinados *factores* y *acciones*, se identifican los efectos que estas acciones provocan sobre los factores del Medio Ambiente. Los expertos del equipo interdisciplinar apropiado, son los encargados de realizar esta identificación, que queda materializada en la Matriz de Importancia del proyecto, cuya estructura se muestra en la tabla 1.2. Los factores están representados en las filas y en las columnas se representan las acciones. En la celda ij de la Matriz se encuentra la Importancia I_{ij} del impacto que la acción A_j provoca sobre el factor F_i , la metodología para la determinación de la importancia se describirá en el apartado siguiente. La fila y la columna marcadas como *Totales* son empleadas para agregar información acerca de una determinada acción o factor respectivamente, según se explicará posteriormente.

Tabla 1.2 Matriz de Identificación de Impactos

Factores		Acciones					Totales
	UIP	A ₁		A _k		A _m	
F ₁	P ₁	I ₁₁		I _{1k}		I _{1m}	
F _i	P _i	I _{ii}		I _{ik}		I _{im}	
F _n	P _n	I _{n1}		I _{nk}		I _{nm}	
Totales							

Determinación de la importancia de los efectos

La *importancia* de un impacto es la medida cualitativa del mismo, que se obtiene a partir del grado de incidencia de la alteración producida, y de una caracterización del efecto que responde a una serie de atributos tales como extensión, tipo de efecto, plazo de manifestación, entre otros. Según propone Conesa [18], la *importancia* de los impactos se calcula con la ecuación:

$$I = \pm(3I + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + RB) \quad (1.1)$$

Los términos de esta expresión, y su significado, están definidos en el Cuadro 1.1. En la Tabla 1.3, se indican los valores numéricos correspondientes a las variables, según su valoración cualitativa.

Cada Impacto podrá clasificarse de acuerdo a su importancia **I** como:

Irrelevante o Compatible: $0 \leq I < 25$

Moderado: $25 \leq I < 50$

Severo: $50 \leq I < 75$

Crítico: $I \geq 75$

Como puede observarse la valoración cualitativa es en realidad una descripción cuantitativa basada en números enteros, pues la importancia se calcula cuantitativamente asignando números enteros a cada una de las etiquetas recogidas en la Tabla 1.3.

Cuadro 1.1 Variables para la determinación de la importancia de los impactos

○ Naturaleza: Carácter beneficioso o perjudicial del efecto sobre el factor considerado.
○ Intensidad: Grado de incidencia de la acción sobre el factor, en el ámbito específico que actúa.
○ Extensión: Área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto (% del área, respecto al entorno, en que se manifiesta el efecto). Si la acción produce un impacto muy bien localizado, se considerará que el impacto tiene un carácter puntual; en caso contrario se considerará total, teniendo gradaciones intermedias parcial y extenso.
○ Momento: Plazo de manifestación del impacto, tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el factor considerado. Generalmente se expresa en años.
○ Persistencia: Tiempo supuesto de permanencia del efecto desde su aparición. Una vez transcurrido ese lapso el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previa a la acción por medios naturales, o mediante la introducción de medidas correctoras.
○ Reversibilidad: Posibilidad de reconstrucción del factor afectado por el proyecto, es la posibilidad de retorno del factor por medios naturales a las condiciones que tenía antes de la ocurrencia de la acción.
○ Recuperabilidad: Posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado como consecuencia del proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones previas a la actuación, por medio de la intervención humana.
○ Sinergia: Este atributo contempla el reforzamiento de dos o más efectos simple. La componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por acciones que actúan simultáneamente es superior a la que cabría esperar de la manifestación de efectos cuando las acciones actúan por separado.
○ Acumulación: Incremento de la manifestación de un efecto, cuando persiste de forma continuada la acción que lo genera.
○ Efecto: Forma de manifestación del efecto sobre un factor como consecuencia de una acción.
○ Periodicidad: Regularidad de manifestación del efecto.

Tabla 1.3 Valoración de las Variables para el Cálculo de la Importancia del Impacto (Tomado de [18])

NATURALEZA		INTENSIDAD (I)	
Impacto beneficioso	+	Baja	1
Impacto Perjudicial	-	Media	2
		Alta	4
		Muy Alta	8
		Total	12
EXTENSIÓN (EX)		MOMENTO (MO)	
Puntual	1	Largo Plazo	1
Parcial	2	Medio Plazo	2
Extenso	4	Inmediato	4
Total	8	Crítico	(+4)
Crítica	(+4)		
PERSISTENCIA (PE)		REVERSIBILIDAD (RV)	
Fugaz	1	Corto Plazo	1
Temporal	2	Medio Plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
SINERGIA (SI)		ACUMULACIÓN (AC)	
Sin Sinergismo	1	Simple	1
Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy Sinérgico	4		
EFECTO (EF)		PERIODICIDAD (PR)	
Indirecto (Secundario)	1	Irregular o aperiódico y discontinuo	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4
RECUPERABILIDAD (RB)		IMPORTANCIA (I)	
Recuperable de manera inmediata	1	$I = \pm(3I + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + RB)$	
Recuperable a medio plazo	2		
Mitigable	4		
Irrecuperable	8		

Análisis Cualitativo Global

Una vez conformada la Matriz de Importancia con cada una de las importancias de los impactos, se analiza el impacto del proyecto en su totalidad; preliminarmente se efectúa una depuración de la Matriz de Importancia eliminando aquellos impactos:

- Que resulten irrelevantes. Tienen una importancia por debajo de cierto valor umbral.
- Que se presenten sobre factores para los que no se dispone de un indicador adecuado.¹
- Que resulten extremadamente severos y por tanto necesiten un tratamiento especial.

Seguidamente se procede a la *Valoración Cualitativa del Impacto Ambiental Total*. Para obtener este indicador se realiza el análisis numérico de la Matriz de Importancia depurada, consistente en sumas y sumas ponderadas por UIP; estas sumas se realizan por filas y por columnas. Nuevamente estamos ante un proceso cuantitativo basado en números enteros, cuando lo que se quiere obtener es una valoración cualitativa.

Las sumas por columnas permiten identificar las acciones más agresivas (valores altos negativos), las poco agresivas (valores bajos negativos) y las beneficiosas (valores positivos); así como las sumas por filas, permiten identificar los factores más afectados por el proyecto, ya sea positiva o negativamente. Si se comparan estos resultados en situaciones diferentes del proyecto se pueden analizar varias alternativas del mismo.

A continuación se muestran algunos indicadores utilizados con el fin de estimar el impacto conjunto de varios efectos. Se ha supuesto que la matriz tiene n factores, m acciones, y donde I_{ij} es la importancia del impacto de la acción A_j sobre el factor F_i , cuya importancia relativa al entorno es P_i .

- Importancia de los efectos debidos a la acción A_j :

$$I_{A_j} = \sum_{i=1}^n I_{ij}$$

- Importancia de los efectos sufridos por el factor F_i :

$$I_{F_i} = \sum_{j=1}^m I_{ij}$$

¹ Esta metodología especifica que estos efectos deben contemplarse separadamente, pero no se aclara en qué forma debe hacerse; estos efectos no se incluyen en la matriz depurada porque la metodología no tiene herramientas adecuadas para su análisis.

- Importancia relativa al entorno de los efectos debidos a la acción A_j :

$$I_{R-A_j} = \sum_{i=1}^n P_i I_{ij}$$

- Importancia relativa al entorno de los efectos sufridos por el factor F_i :

$$I_{R-F_i} = \sum_{j=1}^m P_i I_{ij} = P_i \sum_{j=1}^m I_{ij}$$

- Importancia Total del proyecto:

$$I_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}$$

- Importancia Total del proyecto relativa al entorno:

$$I_{R-T} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i I_{ij}$$

1.2.2 Valoración Cuantitativa

Los resultados obtenidos en la Valoración Cualitativa son un complemento necesario para el desarrollo de la etapa de Valoración Cuantitativa, puesto que en esta fase se realizan estudios técnicos más detallados que permiten predecir numéricamente cada uno de los impactos individuales (a diferencia de la predicción lingüística obtenida en la fase anterior), y que posteriormente se agrupará para obtener una predicción numérica del impacto total.

La predicción numérica se transforma en las variables *Calidad Ambiental* y *Valor Ambiental*, que son intangibles y adimensionales, y por estas características, deben tratarse de manera cualitativa; sin embargo, esta metodología no brinda herramientas para ello.

Indicadores ambientales y Magnitud de los impactos

Un indicador de un factor ambiental es una variable que permite medir al factor. Las unidades de medida de cada indicador están determinadas por el propio indicador, por lo que cada factor será medido en unidades diferentes, consecuentemente, no pueden realizarse comparaciones entre dos factores tomando como base sus indicadores.

La Magnitud de un impacto es la estimación cuantitativa del efecto que éste tendrá sobre el factor ambiental, es el valor que se espera tome el indicador del factor. Esta

estimación la realizan expertos en el factor correspondiente. La magnitud del impacto generalmente se registra en la Matriz de Magnitudes.

La magnitud del impacto total recibido por un factor es la agregación de las magnitudes de los impactos que provocan las diferentes acciones del proyecto sobre dicho factor, es decir:

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

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.

En la tabla 1.4, se muestran algunos ejemplos de funciones de agregación, pues esta función depende del factor considerado.

Tabla 1.4 Funciones de agregación

Agregación	$M_i = Ag_i(M_{i1}, \dots, M_{ij}, \dots, M_{im})$
Sin sinergia	$M_i = \sum_{j=1}^m M_{ij}$
Con sinergia lineal	$M_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} + \sum_{k=j+1}^m S_{ij}(M_{ij} + M_{ik})$ S_{ij} es el coeficiente de sinergia del factor F_i
Con sinergia potencial	$M_i = K^{r-1} \sum_{j=1}^m M_{ij}$ 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	$M_i = 10 \log_{10} \left[\sum_{j=1}^m 10^{(M_{ij}/10)} \right]$

Calidad Ambiental y Funciones de Transformación

La magnitud del impacto total recibido por cada factor está indicada en las unidades características de su indicador, por lo que no es posible hacer comparaciones entre los impactos recibidos por factores diferentes.

Para hacer esta comparación es necesario describir en una escala común las magnitudes de los impactos recibidos por cada factor, esta escala se denomina Calidad Ambiental y, se utilizan las Funciones de Transformación para homogeneizar en esa escala común las magnitudes. 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 universo sobre el que están medidas la magnitudes de los impactos recibidos por el factor F_i , y $[0,1]$ es el intervalo en el que se medirá la Calidad Ambiental, que es una variable. Se asigna el valor cero (0) a la situación ambiental más desfavorable, y uno (1) a la situación óptima.

La forma de la función CA_i depende del factor considerado, y su determinación es una tarea muy compleja en la EIA, ya que la forma de medir la Calidad Ambiental puede variar notablemente de un autor a otro.

Esta metodología también permite calcular el impacto que causa el proyecto sobre un factor determinado utilizando la Calidad Ambiental Neta, definida como la diferencia entre la calidad ambiental con el proyecto y la calidad ambiental sin el proyecto; se calcula de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} CA_{neta-i} &= CA_{con-i} - CA_{sin-i} \\ CA_{con-i} &= CA_i (M_{con-i}) \\ CA_{sin-i} &= CA_i (M_{sin-i}) \end{aligned}$$

donde CA_{neta-i} es la cantidad ambiental neta del factor F_i ; CA_{con-i} es la calidad ambiental del factor F_i 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 el proyecto respectivamente.

Valor del Impacto sobre un Factor

La medida que combina la importancia y la calidad ambiental neta del impacto recibido por un factor es el *Valor* del impacto que se calcula como:

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

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_{neta-i} es su calidad ambiental neta; a_i y b_i son variables auxiliares; y además $|\cdot|$ y $sig(\cdot)$ 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) estima de manera global cuán severo para el Medio Ambiente resulta el proyecto, y se calcula como la suma ponderada de los valores de los impactos recibidos por cada factor, en la cual la ponderación se realiza por medio de las unidades de importancia (UIP) de cada factor:

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

donde 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 .

La suma de la UIP de todos los factores P_i es 1000, por lo que el indicador IAT puede tomar valores en el intervalo $[-1000,+1000]$, resultando los proyecto más severos al ambiente aquellos con un Impacto Ambiental Total que se acerque a -1000 , y los más beneficiosos aquellos que se acerque a $+1000$.

El IAT debe calcularse para las distintas alternativas del proyecto tomadas en consideración, pues la comparación entre los IAT de las distintas alternativas permite determinar cuál de ellas resulta mejor para el ambiente.

1.3 TÉCNICAS DIFUSAS EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

La metodología anterior, que llamaremos crisp para distinguirla de la que se describe en esta sección, logra satisfacer los requerimientos de una EIA, aunque al analizarla detalladamente se evidencian algunas debilidades como las que se enuncian a continuación:

Algunas de las variables utilizadas en la valoración cualitativa son cuantitativas. En el cálculo de la importancia del impacto se emplean variables lingüísticas para caracterizar variables perfectamente cuantificables, por ejemplo, la Extensión, el Momento; primero se

convierten en variables no-numéricas para luego asignarle un número entero, asociado a cada etiqueta, y volver a convertirse en variable numérica.

La valoración cualitativa es realmente cuantitativa, pues no es más que la realización de operaciones con los valores numéricos enteros correspondientes a las etiquetas seleccionadas para cada variable, por lo que se puede afirmar que el modelo lingüístico de la valoración cualitativa está definido sobre números enteros.

La valoración cuantitativa utiliza variables cualitativas. En la etapa de Valoración Cuantitativa se utiliza el concepto de Calidad Ambiental, variable intangible y adimensional, por lo que no es cuantificable. De igual manera, puede señalarse la subjetividad implícita en la selección de las Funciones de Transformación, que dependen del experto encargado de hacer esta selección. Igualmente, la variable Valor del impacto ambiental es adimensional, por tanto no es una magnitud medible.

La metodología crisp no brinda un procedimiento para el tratamiento de la incertidumbre presente en las predicciones que se realizan durante el transcurso de una evaluación de impacto ambiental. Tampoco brinda una estrategia para la caracterización de las medidas correctoras, es decir, la metodología no ofrece métodos de ayuda al usuario en la selección de las medidas correctoras.

Las escalas de las variables involucradas en el cálculo de la importancia no son homogéneas, lo que trae como consecuencia que se falseen los pesos de las mismas durante el cómputo de la importancia. Por ejemplo, en la expresión de la importancia del impacto la variable Intensidad pesa tres veces más que la variable Efecto, pero, la variable intensidad puede llegar a valer 12 unidades mientras que la variable Efecto sólo puede llegar a valer 4, por lo que la proporción real entre los pesos de estas dos variables puede llegar a ser de 9 a 1.

De las flaquezas anteriormente mencionadas, las tres primeras se deben a que la metodología crisp no cuenta con las herramientas adecuadas para manipular información numérica y lingüística de forma simultánea; la cuarta y la quinta son carencias de la metodología, mientras que la última viene dada por la diferencia de escala entre las variables.

Las técnicas difusas son una herramienta eficaz y útil para abordar problemas donde imprecisión y vaguedad son inherentes, y también para tratar simultáneamente variables cualitativas y cuantitativas. Los conjuntos difusos han sido utilizados desde hace varios años por su capacidad de representación para la información lingüística, así como para la

representación de conceptos imprecisos [87 - 90], por lo que se propone la utilización de las técnicas difusas para solucionar las deficiencias de la metodología crisp.

Las variables lingüísticas [87 - 90] nos brindan una representación matemática adecuada para los conceptos vagos, aquellos para los cuales no pueden definirse los límites de manera exacta. Muchas de las variables empleadas en los EsIA se refieren a conceptos vagos, por lo que se sugiere sean modeladas por variables lingüísticas. Además, está perfectamente definida la aritmética difusa, para realizar operaciones con datos difusos ([24, 25], [27], [51])

La mayoría de las variables involucradas en los estudios de impacto ambiental definen conceptos vagos por lo que resultaría más efectivo representarlas con variables lingüísticas (las variables de la Tabla 1.3, e incluso la Calidad Ambiental y el Valor de un Impacto).

No obstante, existen otras variables, como la Magnitud, para las cuales la representación con números crisp parece adecuada, pero se debe tener en cuenta que los valores que toma la variable Magnitud son predicciones, por lo que es información imprecisa. La representación crisp es insuficiente para modelar la imprecisión.

Por su parte, los números difusos (subconjuntos difusos de la recta real), permiten modelar la incertidumbre implícita en valores numéricos. Debe señalarse también que los números difusos son una extensión de los números crisp.

En esta sección se presenta una metodología de EIA que utiliza técnicas difusas, desarrollada para la evaluación de impacto ambiental para obras de ingeniería civil [21]. Esta metodología propone modificar la metodología crisp en varios sentidos:

- Representar las variables que se utilizan en el proceso como variables lingüísticas.
- Permitir que los valores asignados a cada variable sean números difusos, es decir, que permitan representar conceptos vagos y valores numéricos imprecisos.
- Desarrollar una estrategia para la caracterización de las medidas correctoras que deben incorporarse en el proyecto.

Esta metodología difusa utiliza Sistemas de Computación con Palabras basados en Aritmética Difusa [21], debido al alto costo que tendría un sistema difuso basado en reglas por el gran número de variables involucradas en el proceso.

1.3.1 Sistemas de Computación con Palabras

La Computación con Palabras [91] es el paradigma empleado para abordar problemas para los que resulta difícil la representación numérica. En ocasiones se emplea como motor de cálculo para sistemas de entradas y salidas numéricas, como es el caso de los Controladores Difusos.

Los Sistemas de Computación con Palabras emplean conceptos lingüísticos como entradas y como salidas, o sea, realizan sus cálculos a partir de palabras. El enfoque más usual es el basado en reglas difusas, pero el usado en esta memoria y que se expone a continuación, está basado en aritmética difusa ([21], [22]).

Computación con Palabras mediante aritmética difusa

Se supone un sistema de n variables de entrada y una salida, donde cada variable de entrada v_i es una variable lingüística y está definida sobre el universo de discurso U_i , mientras que la variable de salida es también una variable lingüística y se define sobre el universo V . Si denotamos F_{U_i} el conjunto de todos los conjuntos difusos definidos sobre U_i y F_V el conjunto de todos los conjuntos difusos definidos sobre V entonces el Razonamiento Aproximado (RA) es una aplicación de F_U en F_V .

$$RA: F_U \rightarrow F_V \quad \text{con} \quad F_U = F_{U_1} \times F_{U_2} \times \cdots \times F_{U_n}$$

Los conjuntos difusos que forman F_U están asociados al contenido semántico de las variables de entrada por lo que las salidas del bloque Interpretación Lingüística (como se nombra en el caso de la computación con palabras al difusor) son números difusos.

Se propone además reemplazar el sistema basado en reglas del Motor de Inferencia Difuso, por una Función de Razonamiento Aproximado que opere sobre números difusos y produzca números difusos. Se propone que la función sea la extensión de una función crisp de razonamiento aproximado (*fra*) y que opere sobre las variables de entrada definidas en el intervalo $[0, 1]$:

$$fra: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$$

Es necesario que la *fra* sea estrictamente monótona creciente o decreciente en sus argumentos, o continua de un único argumento.

El sistema de Computación con Palabras propuesto se muestra en la figura 1.3.

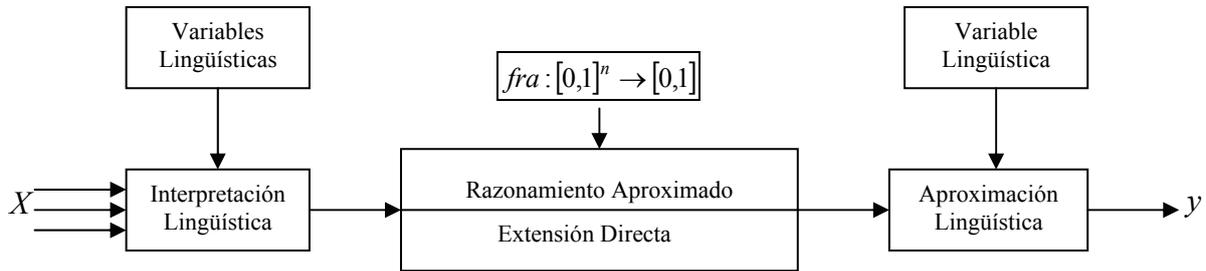


Fig. 1.3 Sistema de Computación con Palabras basado en aritmética difusa.

Las entradas válidas del bloque de Interpretación Lingüística, y sus correspondientes salidas, entradas del bloque de Razonamiento Aproximado, se muestran en el cuadro 1.2.

Cuadro 1.2 Entradas y Salidas válidas del bloque de Interpretación Lingüística.

Entrada	Interpretación
Número crisp	El número difuso trapezoidal $T(z, z, z, z)$
Intervalo $[z_1, z_2]$	El número difuso trapezoidal $T(z_1, z_1, z_2, z_2)$
Número difuso Z	El mismo número difuso Z
Palabra	El número difuso asociado a la etiqueta correspondiente
Palabras precedidas por el modificador <i>A LO SUMO</i>	Si la etiqueta correspondiente tiene asignada el número trapezoidal $T(a, b, c, d)$ entonces se le asocia el número difuso trapezoidal $T(0, 0, c, d)$
Palabras precedidas por el modificador <i>POR LO MENOS</i>	Si la etiqueta correspondiente tiene asociado el número difuso trapezoidal $T(a, b, c, d)$ entonces se asigna en difuso trapezoidal $T(a, b, 1, 1)$
La palabra <i>NADA</i>	El número difusa trapezoidal $T(0, 0, 0, 0)$
La palabra <i>CUALQUIER COSA</i>	El número difuso trapezoidal $T(0, 0, 1, 1)$

La consistencia entre el conjunto difuso resultado del Razonamiento Aproximado y cada una de las etiquetas de la variable salida, se interpreta como una medida de la posibilidad de que el resultado del Razonamiento Aproximado tenga el significado semántico de la etiqueta lingüística correspondiente. Este valor se clasifica según los siguientes intervalos:

- Si es mayor que $2/3$ es “*muy posiblemente*”
- Si está entre $1/3$ y $2/3$ es “*posiblemente*”
- Si es menor que $1/3$ es “*poco posiblemente*”
- Si es igual a cero no se califica la salida con la etiqueta respectiva.

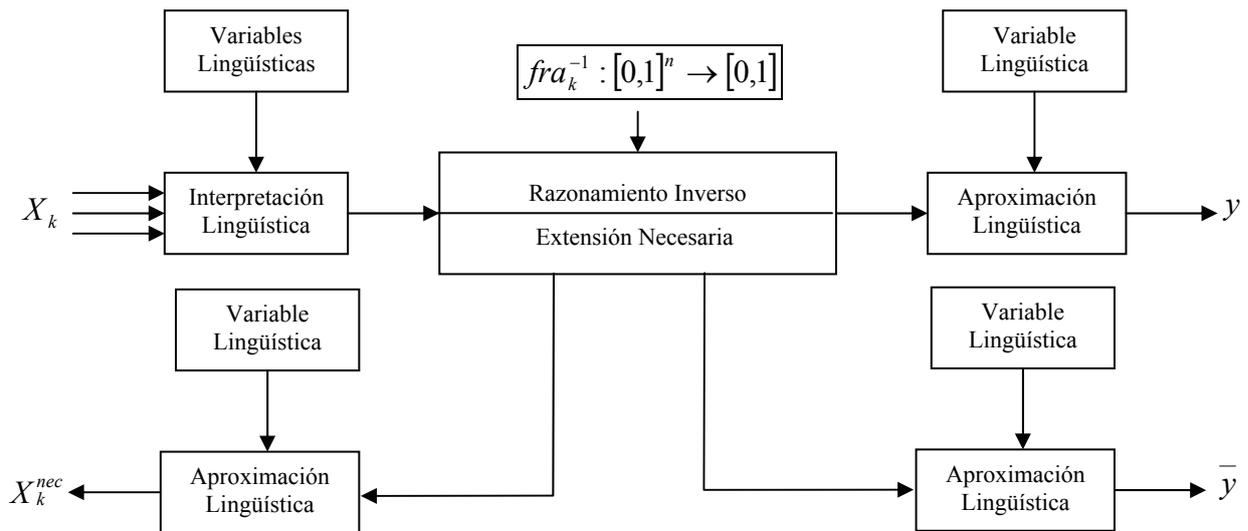


Fig. 1.4 Razonamiento Inverso en un Sistema de Computación con Palabras

El bloque de Aproximación Lingüística recibe un número difuso, resultado del bloque de razonamiento aproximado, y puede producir uno de los tres tipos siguientes de salidas:

- La etiqueta de la variable lingüística cuya consistencia con y es máxima
- Un conjunto de frases de la forma “Y es POS (*cons*) ET”, donde *cons* es la consistencia de y con la etiqueta ET y POS puede ser “poco posiblemente”, “posiblemente” o “muy posiblemente”. Un ejemplo de salida sería: “muy posiblemente (0.8) Baja y posiblemente (0.45) Media”
- El número y , de forma tal que la salida pueda ser la entrada de otro.

Además puede emplearse la Extensión Necesaria ([21], [22]) para realizar el Razonamiento Inverso, para lo que se propone un sistema como el que se muestra en la figura 1.4.

1.3.2 Metodología Difusa para la Evaluación de Impacto Ambiental (TDEIA)

La metodología difusa de evaluación de impacto ambiental se ha diseñado tomando como base la metodología crisp mostrada en la sección 1.2, con la incorporación de técnicas difusas. Se distinguen dos fases básicas (similares a las fases Valoración Cualitativa y Valoración Cuantitativa de la metodología crisp), se denominan Valoración Aproximada (o de granularidad gruesa) y Valoración Detallada (o de granularidad fina).

Además, se presenta una estrategia para caracterizar las medidas correctoras, que permite calcular la importancia de las medidas que deben tomarse. Para más detalles ver [21].

Valoración difusa aproximada

La etapa de Valoración Aproximada puede ser vista como una extensión de la fase Valoración Cuantitativa de la metodología crisp, por lo que ambas etapas resultan semejantes en cuanto a su desarrollo.

Los pasos a seguir durante el desarrollo de esta etapa son:

1. *Descripción del Medio Ambiente como un conjunto de factores medioambientales.*

La descripción del entorno se propone sea una estructura jerárquica, dejándose al usuario la definición de cuantos niveles debe tener el árbol, así como el nombre asociado a cada nivel (Figura 1.5). El árbol debe tener al menos dos niveles: el nivel correspondiente al Entorno (nodo raíz), y el correspondiente a los Factores Ambientales (nodos hojas). Análogamente a como se hace en la metodología crisp, a cada factor se le asigna una medida de su importancia relativa al entorno, dada en Unidades de Importancia (UIP), y la suma de estos valores debe ser 1000; se propone asignar 1000 UIP al nodo raíz del árbol, y luego repartir el peso de cada nodo entre sus nodos hijos.

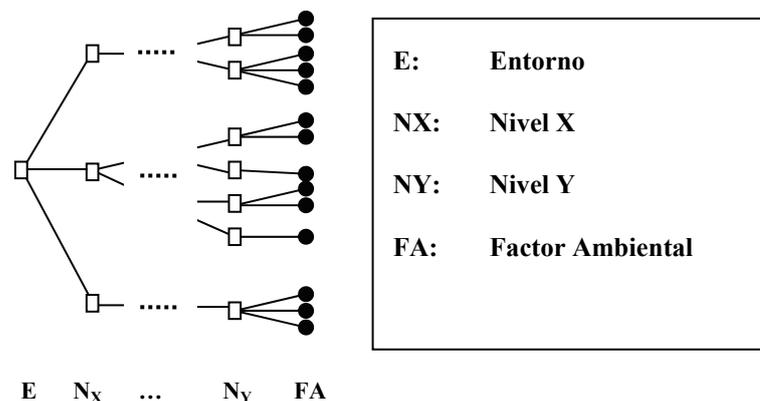


Fig. 1.5 Identificación de los factores ambientales

2. *Descripción de la actividad evaluada como un conjunto de acciones.* Se propone representar las acciones por medio de una estructura jerárquica, y al igual que en la Identificación de los Factores, se deja al usuario la definición de la cantidad de

niveles. El árbol deberá tener al menos dos niveles: el nivel correspondiente al Proyecto (nodo raíz) y el nivel correspondiente a las Acciones (nodos hojas).

3. Identificación de los impactos que provoca cada acción sobre cada factor medioambiental.
4. Caracterización de la Importancia de cada impacto.
5. Análisis de la importancia global de la actividad sobre el entorno.

Determinación de la Importancia Difusa de los impactos

En esta metodología difusa de EIA se propone para el cálculo de la Importancia Difusa de los impactos el uso del Sistema de Computación con Palabras basado en aritmética difusa [21], mostrado en la sección anterior; además se permite que cada grupo de expertos escoja su propio sistema para el cálculo de la importancia.

Cada impacto puede ser calculado con un sistema diferente, de esta forma cada grupo de expertos podrá emplear las variables que considere necesarias y definir las de forma independiente a los demás grupos.

Los sistemas para el cálculo de la importancia de los impactos que se proponen tendrán las siguientes características:

- La variable Naturaleza del Impacto no será considerada una variable de entrada y sólo será empleada en el Análisis Aproximado Global.
- Cada variable de entrada podrá definirse sobre cualquier intervalo [a, b] de la recta real, e internamente el sistema efectuará un cambio de escala al intervalo [0,1].
- La salida será la Importancia del Impacto, y estará representada en el intervalo [0,1].
- Las variables de entrada y de salida serán variables lingüísticas y el usuario definirá las etiquetas de cada variable y el conjunto difuso representativo de cada etiqueta.
- La función de razonamiento aproximado del sistema será:

$$fra : y = \sum_{i=1}^n f_i w_i g_i(x_i) + \sum_{i=1}^n (1 - f_i) w_i g_i(i - x_i)$$

donde f_i es un parámetro que toma valor 0 ó 1 e indica si la salida es creciente o no con respecto a la variable i de entrada; w_i es el peso de la variable i en el cálculo de la

importancia y es definido por el usuario (se recomienda que la suma de los pesos sea igual a 1), y además la función $g(x_i)$ es $g(x_i) = (x_i)^{\theta_i}$ donde θ_i es un exponente seleccionado por el usuario, se emplea $\theta_i=2$ como valor por defecto.

Análisis aproximado difuso global

Esta es la etapa del proceso en la que se determina si el proyecto es compatible o no con el Medio Ambiente, y para ello se calculan algunos indicadores difusos.

Para el cálculo de estos indicadores, primero notaremos por *IMP* a un vector que contiene q Importancias Difusas:

$$IMP = [\#I_1 \quad \#I_2 \cdots \#I_q]$$

donde cada $\#I_k$ representa la importancia difusas del impacto que una cierta acción produce sobre cierto factor ambiental. Este vector puede estar formado por todas las importancias difusas del proyecto, o por todas las importancias de los impactos recibidos por un factor F_i , o por todas las importancias de los impactos producidos por una acción A_j .

Los indicadores difusos propuestos se calculan con sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa y tienen las siguientes características:

- Las entradas del sistema son importancias difusas y la salida es un indicador difuso, que se sugiere sea asociado a una variable lingüística.
- No se tiene un número fijo de entradas al sistema, por lo que el mismo se adecua a cada valor de q .
- Los sistemas operan sobre un vector *IMP* de q Importancias difusas, que pueden ser: un número crisp, un intervalo, una restricción difusa o una palabra (que puede ser *CUALQUIER COSA*).
- La salida tiene una relación creciente con todas las entradas.
- Se hace un pre-procesamiento de cada entrada al sistema con la variable naturaleza del Impacto.

Se propone utilizar los indicadores difusos que se listan en la tabla 1.5, que difieren en su función de razonamiento aproximado.

Tabla 1.5 Indicadores Difusos para el Análisis Aproximado Global

Indicador	Fra	Intervalo
Importancia Media	$fra : y = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i$	[-1, 1]
Importancia Relativa al Entorno	$fra : y = \sum_{i=1}^q P_i x_i$	[-a, a]
Importancia Absoluta	$fra : y = \sum_{i=1}^q x_i$	[-b, b]
Importancia Media Ponderada	$fra : y = \frac{\sum_{i=1}^q P_i x_i}{\sum_{i=1}^q P_i}$	[-1, 1]
Importancia Máxima (Optimista)	$fra : y = \max_{i=1...q} \{x_i\}$	[-1, 1]
Importancia Mínima (Pesimista)	$fra : y = \min_{i=1...q} \{x_i\}$	[-1, 1]

Valoración Difusa Detallada

Esta es la etapa equivalente a la fase Valoración Cuantitativa de la metodología crisp y tiene como objetivo final la determinación del Valor del Impacto Total. Para ello se proponen varios sistemas de computación con palabras usando aritmética difusa.

Agregación por factor

La agregación de las magnitudes por factor para el cálculo de la magnitud del impacto total recibido por un factor ambiental, se realiza mediante un sistema basado en aritmética difusa cuya función de razonamiento aproximado será de la forma:

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

donde M_i representa la magnitud del impacto total recibido por el factor F_i con proyecto, Ag_i y M_{ij} se definen como en la metodología crisp (ver sección 1.2.2).

El usuario es el encargado de definir variables lingüísticas sobre los intervalos convenientes, lo cual dependerán del factor analizado y del indicador ambiental empleado.

En la Tabla 1.4 se encuentran las funciones de agregación que se sugieren, estas funciones son las mismas que las propuestas en la metodología crisp.

Calidad ambiental por factor y Calidad ambiental neta por factor

La *Calidad Ambiental* de un factor se calcula utilizando un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa, cuya una entrada es la Magnitud, y su salida es la Calidad Ambiental, que está definida sobre el intervalo [0,1]. La función de razonamiento de este sistema es la Función de Transformación del factor. Se utiliza el mismo sistema para calcular la calidad ambiental con proyecto y la calidad ambiental sin proyecto.

Para el cálculo de la Calidad Ambiental Neta de un factor se emplea un sistema de computación con palabras cuya función de razonamiento aproximado es:

$$CA_{neta-i} = CA_{con-i} - CA_{sin-i}$$

que tiene como entradas la Calidad Ambiental con el Proyecto y la Calidad Ambiental sin el Proyecto. La salida, Calidad Ambiental Neta, está definida sobre el intervalo [-1,1] y se sugiere sea definida como una variable lingüística con cinco etiquetas: *Empeora Mucho*, *Empeora*, *No Cambia*, *Mejora* y *Mejora Mucho*.

Valor del impacto por factor

El Valor del Impacto Ambiental es una medida que combina la información obtenida en el análisis aproximado y la que se ha obtenido en el análisis detallado. Se propone para su cálculo un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa con dos entradas: La Importancia Media y la Calidad Ambiental Neta de cada factor. Las entradas y la salida se definen sobre el intervalo [-1,1].

La función de razonamiento aproximado del sistema es:

$$V_i = \beta(a_i) + (1 - \beta)(b_i)$$

$$|a_i| = (|I_{Med-i}|)^\phi \quad sig(a_i) = sig(I_{Med-i})$$

$$|b_i| = (|CA_{neta-i}|)^\varphi \quad sig(b_i) = sig(CA_{neta-i})$$

donde β , ϕ , φ son parámetros que selecciona el usuario (se sugiere emplear $\beta=0.5$, $\phi=1$, $\varphi=1$), $| \cdot |$ y $sig(\cdot)$ son los operadores de valor absoluto y signo respectivamente, I_{med-i} es la importancia media del impacto recibido por el factor F_i . Los valores de ϕ , φ sirven para resaltar o atenuar los valores cercanos a cero de la entrada correspondiente y β se emplea para modificar el peso que tienen las dos entradas en el cálculo de la salida.

Se sugiere emplear para la salida una variable lingüística con cinco etiquetas: *Muy Malo, Malo, Regular, Bueno y Muy Bueno*.

Valor del impacto ambiental total

El sistema de computación con palabras utilizado para el cálculo del Impacto Ambiental difuso Total (IAT), tiene como entradas los valores de los impactos recibidos por los factores ambientales afectados por el proyecto. Las entradas y las salidas están definidas sobre el intervalo $[-1,1]$.

La función de razonamiento aproximado (*fra*) sugerida para este sistema es una suma ponderada de los valores de impacto de cada factor.

$$fra : y = \sum_{i=1}^n P_i x_i$$

donde n es el número de factores ambientales, P_i es la importancia relativa al entorno del factor F_i , que se encuentra entre 0 y 1 y x_i es el valor del impacto recibido por el factor F_i . Es importante señalar que la suma de todos los pesos es 1, es decir, $\sum_{i=1}^n P_i = 1$.

Se sugiere emplear una variable lingüística para la salida con cinco etiquetas: *Muy Malo, Malo, Regular, Bueno y Muy Bueno*.

Determinar medidas correctoras según la valoración aproximada.

La metodología difusa permite proponer la selección de medidas correctoras que deben incluirse para poder aprobar un proyecto, tomando como base la valoración aproximada.

Se busca caracterizar las medidas correctoras, lo cual se realiza mediante la estimación de la importancia del impacto corregido, es decir, se calcula cómo debe ser la importancia de un conjunto de impactos individuales para que un indicador, como los de la tabla 1.5, esté dentro de los límites aceptables. Debe notarse que corresponde al grupo de expertos determinar si es técnica y económicamente posible realizar las correcciones necesarias.

Los indicadores de la valoración aproximada se obtienen por medio de sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa, por lo que se propone efectuar razonamiento inverso para obtener una caracterización de las medidas correctoras.

El razonamiento inverso emplea el algoritmo de Extensión Necesaria ([21], [22]), para ello es indispensable que la función de razonamiento aproximado del sistema de computación con palabras sea estrictamente monótona. Esta condición la cumplen todos los indicadores de la Tabla 1.5, excepto la Importancia máxima (optimista) y la Importancia mínima (pesimista).

Primero, notaremos $IMP = [\#I_1, \#I_2, \dots, \#I_q]$ un vector de q importancias difusas con el cual se ha calculado cierto indicador y el resultado ha sido $\#IND$. Se desea modificar algunos componentes del vector IMP , para que el nuevo valor del indicador sea $\#IND^*$.

Estimación de las medidas correctoras modificando un impacto

1. Seleccionar el impacto que se desea modificar. Denominaremos $\#I_C$ a su importancia antes de la corrección y $\#I_C^*$ a su importancia después de su corrección, el subíndice c denota que es el elemento c dentro del vector IMP .
2. Especificar el valor que se desea tome el indicador $\#IND^*$, que puede ser un número crisp, un intervalo, un número difuso, o una palabra.
3. Construir un sistema de computación con palabras cuya función de razonamiento aproximado es la Extensión Necesaria de la función del indicador correspondiente. Este sistema tiene como entradas los elementos del vector $[\#IND^*, \#I_1, \#I_2, \dots, \#I_{C-1}, \#I_{C+1}, \dots, \#I_q]$ y su salida es $\#I_C^*$.
4. Verificar el valor del indicador que se obtiene con la modificación. Este valor no es siempre $\#IND^*$, pues el algoritmo de Extensión Necesaria puede modificarlo.

En el procedimiento mostrado anteriormente se supone que sólo se desea modificar un impacto de los involucrados en el cálculo del indicador; pero puede darse la situación en la que quieran modificarse varios de los impactos. El procedimiento anterior puede ser modificado y extendido para el caso en que quieran modificarse t impactos.

Estimación de las medidas correctoras modificando t impactos

1. Reorganizar el vector IMP en dos subvectores, $IMP = [IMP_{fijo}, IMP_{modificable}]$, el primero formado por las importancias de los impactos que no se desean modificar y el otro por las importancias de los impactos que si se desea modificar.
2. Calcular los coeficientes de la función de razonamiento aproximado del sistema utilizado para obtener el valor del indicador considerando los q elementos de IMP .

3. Construir un nuevo vector IMP^* compuesto por los elementos del vector IMP_{fijo} y nueva importancia $\#I_{ag}$, $IMP^* = [IMP_{fijo}, \#I_{ag}]$.
4. Construir la nueva función para calcular el indicador (FI) en la que el coeficiente de $\#I_{ag}$ será la suma de los coeficientes de los elementos del vector $IMP_{modificable}$.
5. Estimar las medidas correctoras suponiendo que sólo se quiere modificar el impacto de importancia $\#I_{ag}$, para lo cual se emplea el procedimiento anterior, utilizando la función FI. El resultado de esta estimación es $\#I_{ag}^*$.
6. Descomponer $\#I_{ag}^*$ en las t importancias que deberán tener los impactos modificables. Para hacer la descomposición, sea $\#I_k^*$ la importancia corregida del impacto k . Los α -cortes de $\#I_k$ se obtendrán:

$$\left(\#I_k^*\right)_\alpha = \left[\beta_k D_{\#I_{ag}^*}(\alpha, 1), \beta_k D_{\#I_{ag}^*}(\alpha, -1) \right]$$

donde $D_{\#I_{ag}^*}(\alpha, d)$ es la función $D(\alpha, d)$ del número difuso $\#I_{ag}^*$, β_k es un factor de descomposición con valor entre 0 y 1, la suma de los β_k debe ser 1: $\sum_{k=1}^t \beta_k = 1$

β_k puede calcularse utilizando las estrategias siguientes:

a. Descomposición homogénea: $\beta_k = \frac{1}{t}$

b. Descomposición relativa al entorno: $\beta_k = \frac{P_k}{\sum_{j=1}^t P_j}$ donde P_k es el valor del

peso del factor sobre el que actúa el k -ésimo impacto corregido.

1.4 SISTEMAS INFORMÁTICOS

Debido a que en esta metodología la información que se manipula es voluminosa y muy diversa, se ha considerado necesario el desarrollo de software para facilitar su empleo.

A continuación se detalla el sistema informático TDEIA que implementa la metodología difusa descrita en la sección anterior [21], que puede descargarse de la web <http://arai.ugr.es/eiadifusa>.

1.4.1 TDEIA

El software TEDIA (*Técnica Difusa de Evaluación de Impacto Ambiental*), elaborado en la tesis doctoral del Dr. Oscar Duarte, implementa la metodología difusa para la EIA, mostrada en la sección anterior.

El propósito fundamental de este software es facilitar al usuario la utilización de la metodología difusa para estudios de impacto ambiental presentada en 1.3.2.

Al ejecutar TDEIA, se despliega una ventana como la que se muestra en la Figura 1.6, que contiene una matriz con un resumen del Estudio de Impacto Ambiental.

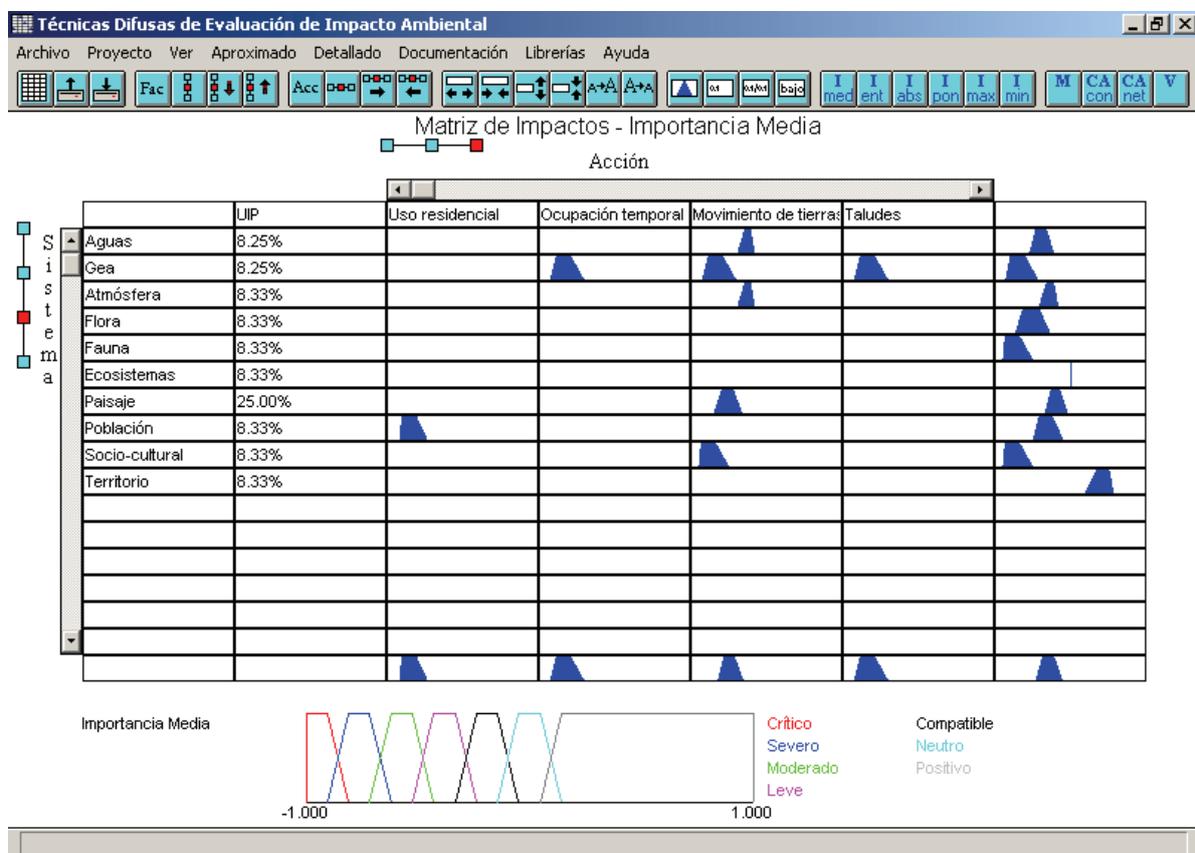


Fig. 1.6 Ventana Principal de TDEIA

Los Factores Ambientales están relacionados en la primera columna de la matriz y en la primera fila las Acciones del Proyecto, la segunda columna contiene las importancias relativas al entorno de cada factor. Si una acción A_j impacta sobre un factor F_i , la celda correspondiente en la matriz reflejará la Importancia de ese impacto.

En la última columna y última fila se muestra el resultado del cálculo de un Indicador, para todos los impactos recibidos por un factor y para todos los impactos producidos por una acción, respectivamente; y en la celda inferior derecha se muestra el cálculo de ese indicador para todo el proyecto. El indicador calculado aparece como encabezado de la matriz (Importancia media en el ejemplo de la Fig. 1.6). En la parte inferior de la ventana, debajo de la matriz, se muestra gráficamente la variable lingüística asociada al indicador calculado.

Las celdas que contienen la importancia de un impacto, o el resultado del cálculo de un indicador, están mostrando la salida de un Sistema de Computación con Palabras. Esta salida, que es un número difuso A , se puede mostrar de varias formas diferentes:

- Mediante una palabra, que es la etiqueta de la variable lingüística de salida.
- Mediante un número crisp, el cual expresa el *valor representativo* de A
- Con dos números crisp, que reflejan el *valor representativo* y la *ambigüedad* de A .
- Mediante una gráfica de la función de pertenencia de A
- Mediante un cuadro de diálogo (figura 1.7), que contiene información más detallada.

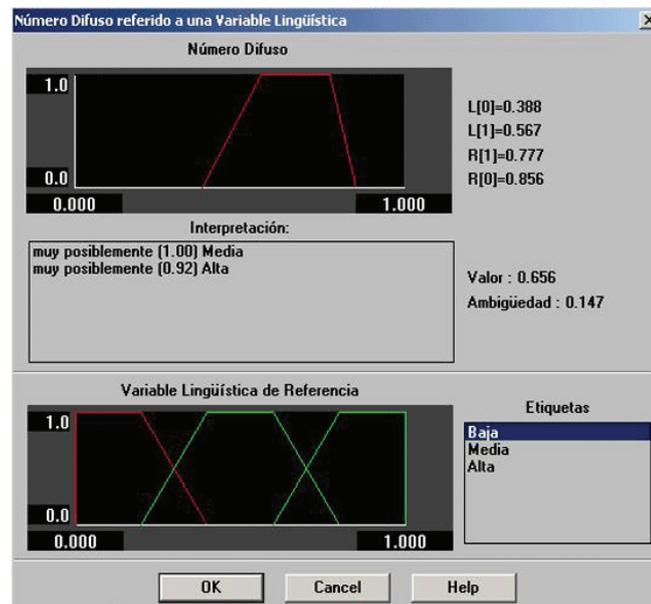


Fig. 1.7 Cuadro de diálogo con información del número difuso

Según la metodología difusa, los factores y las acciones pueden organizarse en una estructura jerárquica cuyo número de niveles puede variar (figura 1.8). El número de niveles empleados se visualizan en la ventana principal de *TEDIA* mediante unos cuadrados de color celeste o rojo, conectados entre sí, a la izquierda y encima de la matriz, de la siguiente forma:

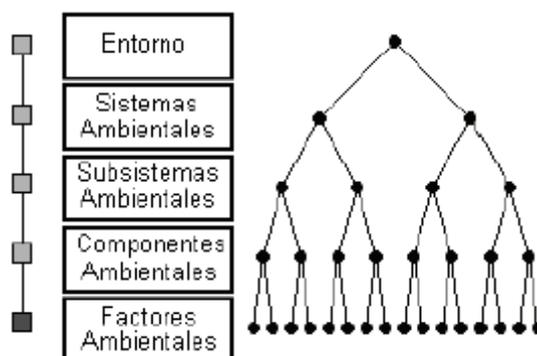


Fig. 1.8 Árbol de factores

El número de cuadrados a la izquierda de la matriz reflejan el número de niveles empleados en la jerarquía de los factores y el cuadrado de color más oscuro indica cuál de esos niveles se está presentando en la matriz (figura 1.8). Los resultados incluidos en la matriz varían según el nivel que se esté analizando. De forma análoga, los cuadrados ubicados encima de la matriz ayudan a visualizar el árbol de las acciones.

Los indicadores que permite *TDEIA* calcular son los siguientes:

- Importancia media
- Importancia mínima (pesimista)
- Importancia relativa al entorno
- Magnitud del Impacto
- Importancia absoluta
- Calidad Ambiental con el proyecto
- Importancia media ponderada
- Calidad Ambiental Neta
- Importancia máxima (optimista)
- Valor del Impacto Ambiental

TDEIA permite además caracterizar las medidas correctoras para cualquiera de los índices de la valoración aproximada (cualquiera de las *importancias* del listado anterior, excepto la importancia máxima y la importancia mínima) siguiendo la metodología expuesta en la sección anterior. Una característica adicional de *TDEIA* es que permite crear y recuperar librerías de Factores, Acciones, Variables Lingüísticas e Indicadores de Importancia.

Capítulo 2

Técnicas Difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental para Zonas Mineras

En los últimos años, se han incorporado técnicas para manejar la información difusa ([20], [26], [52], [87]), a las metodologías de evaluación del impacto ambiental, e incluso en la evaluación del riesgo ambiental [41]; puesto que gran parte de los conceptos e información que se manejan en un estudio de impacto ambiental son inherentemente difusos, de acuerdo con su carácter impreciso o incierto. Las metodologías que utilizan técnicas difusas extienden las metodologías clásicas ([19], [21], [23], [40], [80]).

Teniendo en cuenta que existen estudios sobre el impacto ambiental de la actividad minera de Moa (Cuba), realizados con la metodología clásica descrita en Conesa [18], así como estudios acerca de la aplicación de técnicas difusas conjuntamente con estas metodologías, surge la oportunidad de incorporar las técnicas difusas a la evaluación del impacto ambiental de proyectos mineros.

En este capítulo se describe la aplicación de técnicas difusas en la EIA de la actividad minera de Moa. Moa es una ciudad industrial situada en la costa norte oriental de Cuba. En la zona existen varias industrias que vierten sus residuos sólidos, líquidos o gaseosos al medio ambiente, pero las de mayor incidencia son las plantas procesadoras de níquel Empresa Comandante Pedro Sotto Alba y la Empresa Comandante Che Guevara ([46], [75])

En esta región existen diferentes tipos de yacimientos minerales útiles entre los que sobresalen los ferro-niquelíferos de la corteza laterítica de las rocas ultra-básicas, con reservas confirmadas de más de 800 millones de toneladas de mineral de categoría industrial y que

puede llegar hasta los 3000 millones. También se localizan numerosos yacimientos de minerales de cromo, zeolitas y otros no metálicos.

La circulación del níquel y sus compuestos a través de los diferentes compartimentos ambientales se efectúa mediante procesos químicos y físicos, siendo además biológicamente transportado por los organismos vivos (terrestres y acuáticos) que pueden acumularlo. Entre los procesos físicos cabe destacar el efecto de la erosión natural de los suelos y rocas producto de los vientos existentes que proporcionan concentraciones de fondo de níquel y cobalto, entre otros, en el ambiente.

La puesta en marcha de la Planta de Níquel de Moa (Pedro Soto Alba), a principio de los años 60 resultó un fuerte impacto para la entonces naturaleza virgen de la zona que recibió entonces y recibe hasta la fecha vertidos de residuales líquidos en los ríos adyacentes y en la bahía de Moa y con ellos miles de toneladas de ácido sulfúrico y de metales pesados, gases tóxicos y nocivos procedentes de sus plantas, por otro lado, diariamente se manipulan cientos de toneladas de materias primas que también ocasionan una alta contaminación como es el ácido sulfúrico y el ácido sulfhídrico.

A partir de 1986 la puesta en marcha de la Empresa Comandante. Ernesto Che Guevara (conocida como Punta Gorda) aumentó los problemas medio-ambientales de la región. En esta nueva planta con una capacidad para 30000 toneladas anuales de óxidos de níquel que utiliza tecnología de Lixiviación Carbonato Amoniacal se emiten grandes volúmenes de gases, polvos, residuales sólidos (cola) y líquidos, además de la manipulación de reactivos químicos peligrosos y contaminantes como el amoníaco y el hidrosulfuro de amonio.

Al iniciarse las actividades mineras en la región, la protección medio ambiental no constituía un elemento de máxima prioridad para la minería, todo esto unido a problemas tecnológicos de diseño, originaron en toda el área de influencia de la industria, afectaciones ambientales severas relacionadas con la deforestación, aparición de la erosión, transporte y deposición de sedimentos a partir de las áreas minadas hacia los ríos y el entorno costero, el vertido de efluentes líquidos crudos a ríos o directamente al mar; la deposición de los residuos sólidos (colas); así como las emisiones a la atmósfera de partículas de polvo y gases.

La rehabilitación minera no se realizaba paralelamente a la extracción, por lo que los problemas ambientales se agravaron, fundamentalmente los relacionados con los procesos erosivos, la emanación de polvo a la atmósfera y su posterior deposición en los bosques, la pérdida de ecosistemas y la afectación parcial de otros.

La actividad minera en el territorio causa graves daños sobre el entorno, por lo que existe en la actualidad una degradación ambiental grande en el área. La magnitud de los impactos ambientales provocados por la minería, hace necesaria la realización de estudios ambientales, que propicien una adecuada planificación ambiental del territorio económicamente sostenible.

Tras un análisis completo de TDEIA, se ha visto que se puede utilizar de modo genérico, sin modificaciones importantes, sólo teniendo en cuenta algunas variaciones en el proceso de la EIA. Las modificaciones efectuadas para tratar la situación ambiental específica de Moa (Cuba) de forma más adecuada, están orientadas en tres sentidos fundamentales:

- Estudio de impacto ambiental por zonas de extracción. Cada zona utiliza métodos de extracción diferentes por lo que se propone realizar sus EIAs separadamente.
- EIA teniendo en cuenta la Seguridad Industrial. Es necesario que se cumplan las normas de Seguridad e Higiene Industrial, por lo que en la metodología se deben destacar aquellas acciones que afectan directamente a la salud de los trabajadores y de la comunidad en general, para que sus impactos no superen los límites permisibles.
- Cumplimiento de las normas de Gestión Medio Ambiental ([68], [69]). Cada empresa tiene su sistema de normas de Gestión Ambiental, las cuales rigen la actuación de la empresa con respecto al entorno; es necesario que el impacto de las acciones del proyecto no viole este reglamento, por lo que se propone que el sistema alerte cuando el impacto no sea compatible con las normas de Gestión Ambiental.

Para realizar la adaptación que se presenta ahora, se ha tenido en cuenta la EIA realizada, siguiendo la metodología crisp, para la minería de Moa [46], y la opinión de diferentes expertos ambientales de la industria niquelífera y de la universidad que estudian el área de Moa, a los que se realizaron encuestas y entrevistas, con el fin de obtener una aproximación descriptiva a los métodos, tareas e información involucradas en las EIA de la minería.

Primero se realizaron entrevistas a los expertos ambientales seleccionados para tener una visión general del proceso de evaluación de impacto ambiental de acuerdo con la forma en que ellos lo realizan, y teniendo como base la información obtenida, fueron elaborados formularios con distintos niveles de complejidad para identificar:

1. Los factores ambientales analizados en las evaluaciones de impacto ambiental mineras y su importancia relativa al entorno (la más usual).

2. Las acciones de los proyectos mineros que deben ser tomadas en cuenta para la EIA.
3. Los métodos utilizados para el cálculo de la importancia de los impactos y las variables involucradas en el proceso del cálculo de la importancia del impacto.
4. Las etiquetas usadas para valorar las variables utilizadas para calcular la importancia.
5. Los impactos ambientales más importantes que produce la minería
6. Las medidas utilizadas para la mitigación de los impactos negativos de la minería

Este proceso permitió obtener una aproximación a los elementos a incluir en esta metodología que se presenta, que es similar a TDEIA, pero en este caso se brindan jerarquías generales de factores ambientales y acciones de proyecto. Además se describen cuales son las principales fórmulas utilizadas por los expertos para las valoraciones de los impactos.

En el presente capítulo se describe una metodología para la EIA en zonas mineras que tiene como antecedente TDEIA. Se presentan las etapas fundamentales de la metodología, Valoración Aproximada y Valoración Detallada; descripciones globales de proyectos mineros, de los factores ambientales afectados, los impactos ambientales y las medidas correctoras utilizadas en cada caso. El principal objetivo de detallar estos elementos es brindar a los expertos ambientales un método sencillo para el proceso de identificación de la EIA. Finalmente, se presenta un ejemplo de la aplicación de esta metodología, el proceso de evaluación de impacto ambiental del yacimiento minero Punta Gorda en Moa (Cuba).

2.1 VALORACIÓN APROXIMADA

Para la valoración aproximada, primera fase de la EIA, se establecen las jerarquías de las acciones y de los factores ambientales impactados.

2.1.1 Descripción del proyecto

Se propone representar las acciones del proyecto por medio de una estructura jerárquica. Se deja al usuario la definición de la cantidad de niveles, pero el árbol tendrá al menos dos niveles: Proyecto y Acciones del Proyecto. Para facilitar la labor de los expertos, se presenta una jerarquía genérica de acciones para proyectos mineros.

Para obtener esta jerarquía se hicieron encuestas a los expertos ambientales del territorio

Encuesta: Acciones mineras

El objetivo de la encuesta es determinar del conjunto de acciones que tiene un proyecto minero, cuáles son las que pueden provocar impactos ambientales, y nombrar las acciones y etapas de un proyecto minero como son mayoritariamente conocidas por los expertos.

Esta encuesta se realizó en dos etapas:

1. Identificación de las acciones y etapas de un proyecto minero. (Cuadro 2.1)
2. Establecimiento de prioridades sobre la necesidad de realizarles EIAs. (Cuadro 2.2)

En los cuadros 2.1 y 2.2 se muestran los formularios presentados a los expertos.

Después de realizar la primera encuesta (Cuadro 2.1) y procesar los resultados, se obtuvieron las acciones y etapas de un proyecto minero que no deben ser excluidas en un estudio de impacto ambiental. A continuación se listan las acciones potencialmente impactantes de un proyecto minero y las fases o etapas en las que se encuentran agrupadas. Las etapas fueron renombradas teniendo en cuenta el criterio de los expertos.

Las acciones seleccionadas por los expertos se indican a continuación:

Fase de investigación y planificación

- Apertura de vías de acceso
- Instalación de campamentos
- Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica
- Perforación y recolección de testigos

Apertura (Fase de implantación)

- Contratación de servicios de terceros
- Trabajos topográficos
- Trabajos de perforación geológica
- Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso
- Desbroce
- Escombreo
- Preparación de las áreas de disposición de estériles y relaves
- Instalación de línea de transmisión de energía eléctrica o de un grupo generador
- Implantación de sistema de captación y almacenamiento de agua
- Construcción y montaje de las instalaciones de apoyo
- Disposición de residuos sólidos

Cuadro 2.1 Encuesta Acciones Mineras I

Acciones Mineras: Etapa I

1. ¿Cuáles considera UD. son las acciones que intervienen en un proyecto minero que provocan impactos ambientales? 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	
	Encargo 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	
	Escombreo	
	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	
	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	
	Disposición de relaves	
	Almacenamiento de los productos	
	Almacenaje de insumos	
	Disposición de residuos sólidos	
Mantenimiento		
Fase de Desactivación	Rehabilitación de áreas minadas	
	Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas	
	Remoción de insumos y residuos	
	Demolición de edificios	

Otras consideraciones:

Operación (Fase de operación)

- Decapado del yacimiento
- Carga y transporte del mineral y estéril
- Disposición de estéril
- Extracción del mineral
- Almacenamiento del mineral
- Transporte de maquinarias y equipos
- Mantenimiento de caminos
- Disposición de relaves
- Disposición de residuos sólidos
- Mantenimiento

Abandono (Fase de desactivación)

- Rehabilitación de áreas minadas
- Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas

Estas acciones seleccionadas fueron ordenadas por prioridad, en cuanto a la necesidad de realizarles evaluaciones de impacto ambiental. Para ello fue realizado el segundo cuestionario a los expertos ambientales (Cuadro 2.2).

De esta última encuesta se obtuvo que las acciones mineras que más dañan al medio ambiente son las siguientes; siendo la operación de Desbroce la más impactante al medio.

1. Desbroce
2. Trabajos de perforación geológica
3. Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso
4. Extracción del mineral
5. Carga y transporte del mineral y estéril
6. Escombreo
7. Trabajos topográficos
8. Mantenimiento de caminos
9. Apertura de vías de acceso
10. Transporte de maquinarias y equipos
11. Rehabilitación de áreas minadas
12. Perforación y recolección de testigos
13. Instalación de campamentos

Cuadro 2.2 Encuesta Acciones Mineras II

<i>Acciones Mineras: Etapa II</i>		
1. Ordene las acciones mineras siguientes por prioridad (orden descendente) en cuanto a la necesidad de realizarles evaluaciones de impacto ambiental (27 más prioritaria, ..., 1 menos prioritaria).		
Fase de investigación y planificación	Apertura de vías de acceso	
	Instalación de campamentos	
	Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica	
	Perforación y recolección de testigos	
Apertura (Fase de implantación)	Contratación de servicios de terceros	
	Trabajos topográficos	
	Trabajos de perforación geológica	
	Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso	
	Desbroce	
	Escombreo	
	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 apoyo	
	Disposición de residuos sólidos	
	Operación (Fase de operación)	Decapado del yacimiento
Carga y transporte del mineral y estéril		
Disposición de estéril		
Extracción del mineral		
Almacenamiento del mineral		
Transporte de maquinarias y equipos		
Mantenimiento de caminos		
Disposición de relaves		
Disposición de residuos sólidos		
Mantenimiento		
Abandono (Fase de desactivación)	Rehabilitación de áreas minadas	
	Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas	
Otras consideraciones:		

Los expertos concuerdan en que la acción Disposición de desechos sólidos no se encuentra entre las más impactantes, pues todo proyecto debe tener un plan para el manejo de los desechos sólidos, que debe planificarse a la par de la planificación del proyecto en sí. Así mismo, consideran que es muy importante realizar la evaluación del impacto de la acción Rehabilitación de áreas minadas (tareas propuestas para el mejoramiento del entorno), pues es necesario conocer cuánto podría mejorar el medio tras su ejecución.

Jerarquía Descripción del Proyecto

La metodología propone la utilización de una estructura jerárquica para la modelación del proyecto. En nuestro caso se propone una jerarquía de tres niveles:

1. Proyecto
2. Actividades

3. Acciones

El proyecto que se evalúa se modela como un conjunto de *Acciones*, que se agrupan en *Actividades*.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las encuestas realizadas a los expertos ambientales del territorio, una jerarquía general de acciones para proyectos mineros es la que se muestra en la figura 2.1.

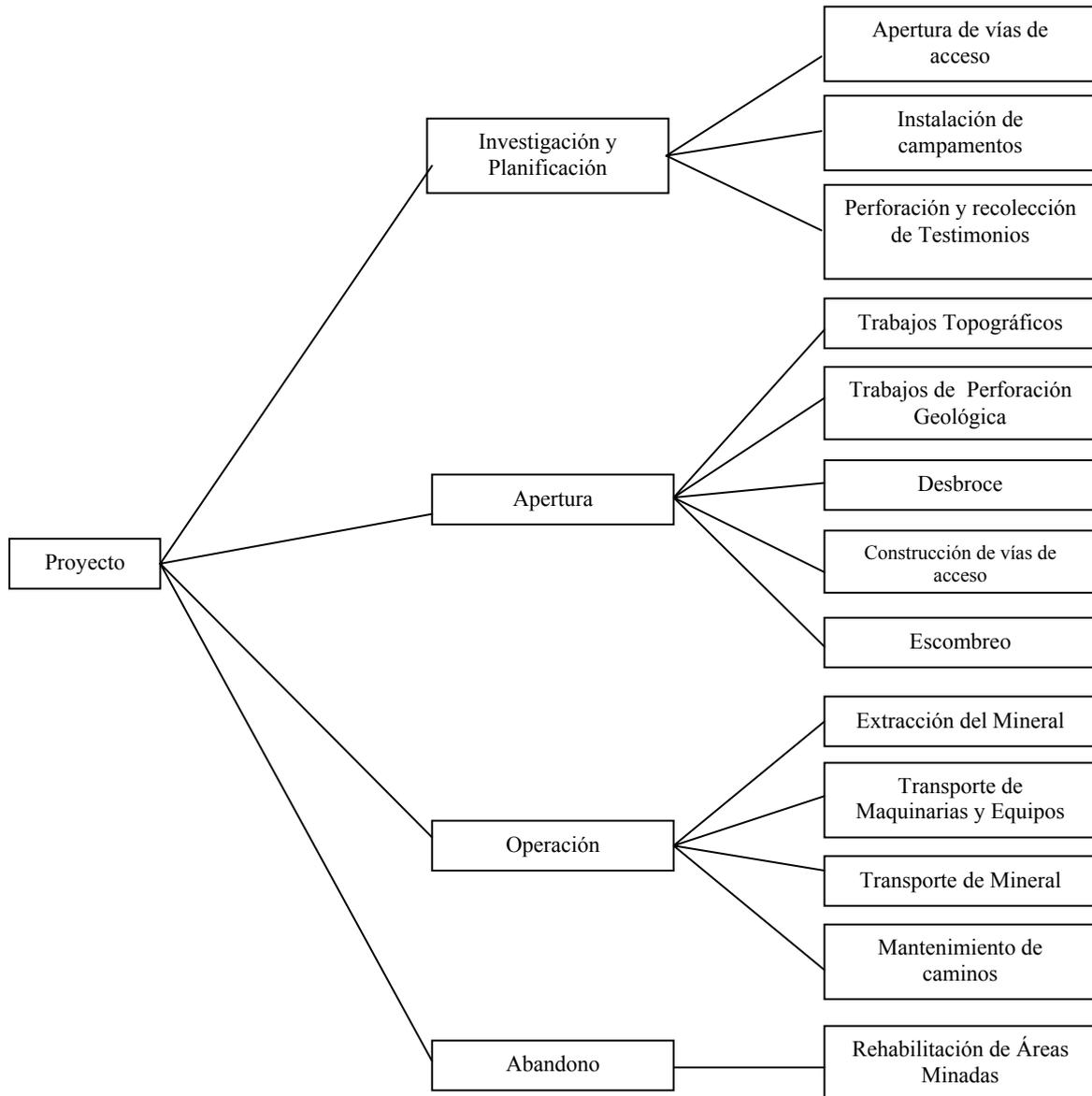


Fig. 2.1 Jerarquía Acciones del Proyecto

2.1.2 Identificación de los factores ambientales

En esta etapa se describe el Medio Ambiente como un conjunto de factores medioambientales. Se propone sea una estructura jerárquica similar a la de la metodología crisp, sin embargo, se deja al usuario la definición de cuántos niveles debe tener el árbol, así como el nombre asociado a cada nivel, el árbol tendrá al menos dos niveles: Entorno Medioambiental y Factores Ambientales.

Análogamente a como se hace en la metodología crisp, a cada factor se le asigna una medida de su importancia relativa al entorno, dada en Unidades de Importancia (UIP), y la suma de estos valores debe ser 1000; pero con el objetivo de hacer más viable el proceso de asignación de UIP, se propone asignar 1000 UIP al nodo raíz del árbol, y luego definir los pesos de los nodos inferiores como un porcentaje del peso del nodo inmediatamente superior.

Encuesta: Factores ambientales

Con el fin de conocer cuáles son los factores que los expertos evalúan durante el proceso de EIA y cuáles son los nombres que utilizan para referirse a los mismos, se realizó una nueva ronda de encuestas, cuyo contenido se refleja en el Cuadro 2.3.

Los expertos plantearon que primeramente se realiza una evaluación general, sin ahondar en detalles. Es por ello que se evalúan los posibles impactos sobre la Infraestructura, por ejemplo, sin realizar estudios detallados sobre la infraestructura vial o eléctrica. Cuando se realizan evaluaciones detalladas por factor, se evalúan todos los posibles componentes de estos, pero estos estudios detallados se realizan en su mayoría después de la puesta en marcha del proyecto a modo de monitoreo ambiental.

De la encuesta, se obtuvo que los factores ambientales principalmente considerados son:

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Geología y Geomorfología | 9. Relaciones ecológicas |
| 2. Suelo | 10. Paisaje |
| 3. Aguas terrestres | 11. Uso del suelo |
| 4. Océano | 12. Población |
| 5. Clima | 13. Infraestructura |
| 6. Aire | 14. Economía |
| 7. Flora y vegetación | 15. Patrimonio histórico, arqueológico
y cultural |
| 8. Fauna | |

Cuadro 2.3 Encuesta Factores Ambientales

1. ¿Qué factores ambientales tiene UD. en cuenta para realizar las evaluaciones de impacto? Marque con una X los factores que UD. utiliza.

Selección	Factor Ambiental	Selección	Factor Ambiental
	Geología y Geomorfología		Cubierta vegetal
	Relieve		Fauna
	Recursos hídricos		Relaciones ecológicas
	Procesos geomorfológicos		Paisaje
	Suelo		Uso del suelo
	Aguas terrestres		Población
	Calidad del agua		Educación
	Aguas superficiales		Salud
	Aguas subterráneas		Empleo
	Océano		Seguridad ocupacional
	Aguas costeras		Infraestructura
	Clima		Viales
	Aire		Obras hidráulicas
	Material particulado		Infraestructura eléctrica
	Ruido		Economía
	Calidad del aire		Patrimonio histórico, arqueológico y cultural
	Flora y vegetación		

a) Proponga si deben considerarse otros factores ambientales

Factor Ambiental	Valoración

Otras consideraciones:

Los expertos ambientales consideran que los factores Océano y Patrimonio histórico, Arqueológico y Cultural, sólo deben ser analizados en los casos en que la zona de actuación del proyecto los afecte; el resto es necesario evaluarlos siempre.

Jerarquía factores ambientales

Durante el proceso de EIA se realiza una caracterización del entorno o medio ambiente que será afectado por el proyecto que se analiza. El entorno se conforma por un conjunto de elementos interrelacionados, dado que su estudio como un todo resulta muy complejo, es necesaria una modelación simplificada. Por esta razón, se divide el *Medio Ambiente* en

Sistemas Ambientales, estos su vez en *Subsistemas Ambientales*, los cuales se dividen en *Componentes Ambientales*, que finalmente se dividen en *Factores Ambientales*.

En la figura 2.2 se muestra la estructura jerárquica definida para la caracterización del entorno hasta el nivel Componentes Ambientales. Esta jerarquía será la utilizada por los expertos en el proceso de identificación de los factores ambientales.

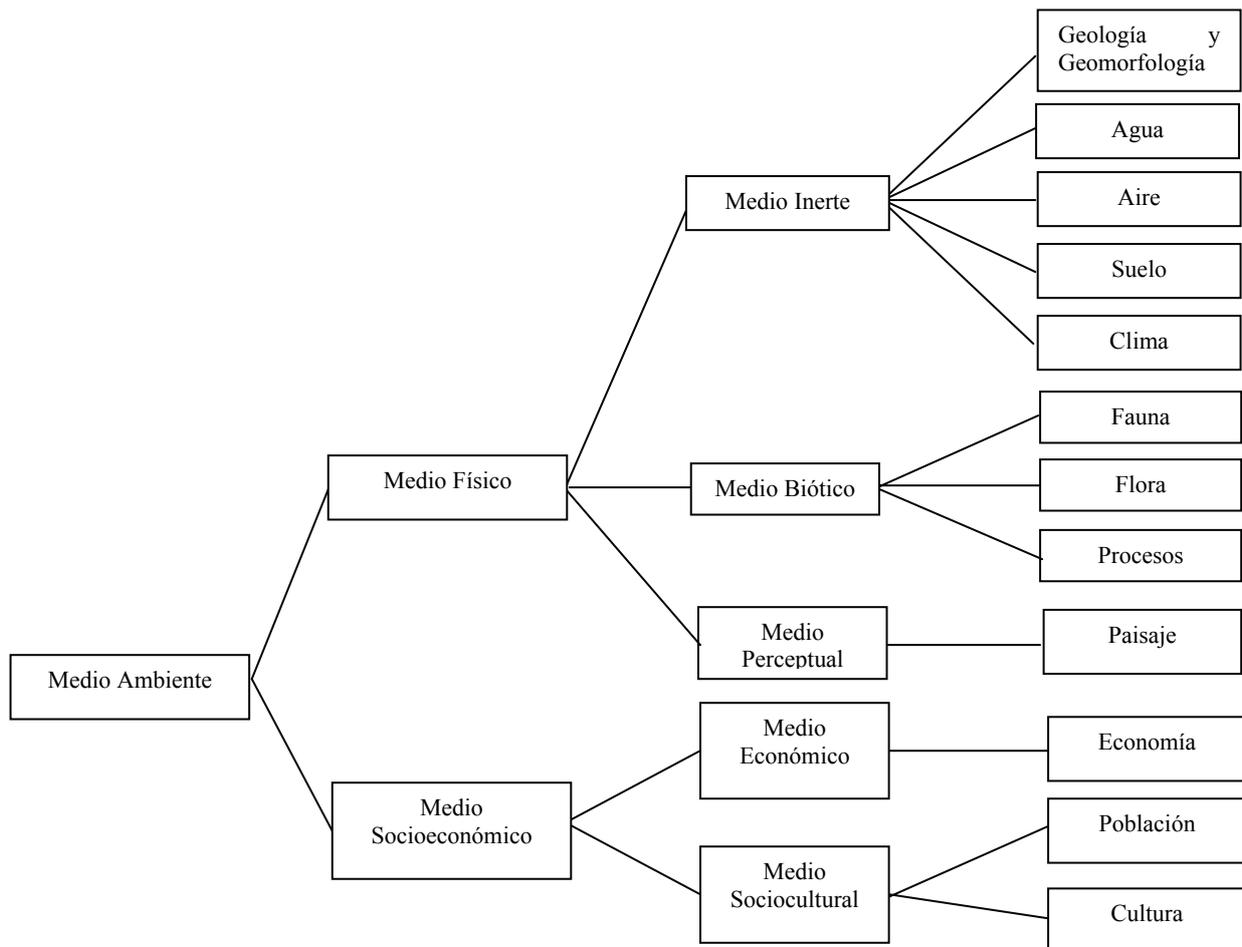


Fig. 2.2 Jerarquía Factores Ambientales

2.1.3 Identificación de los impactos ambientales

En esta etapa se identifican los probables impactos ambientales que provocará el proyecto. El resultado de este trabajo no es más que una lista con los posibles impactos. Este ejercicio debe ser ejecutado de manera sistemática, de forma que comprenda todas las posibles alteraciones ambientales que resulten de la obra.

El conocimiento acumulado y la experiencia anterior forman los fundamentos de una buena identificación de impactos. Los efectos ambientales verificados en obras semejantes dan la primera pista para identificar los posibles impactos de un nuevo proyecto.

Es por ellos que se realizó una entrevista a los expertos ambientales del territorio para identificar los principales impactos que produce la minería sobre el entorno.

Encuesta: Impactos ambientales

Para identificar los impactos que produce la minería sobre el medio se le hizo a los expertos la pregunta: *¿Qué impactos produce la actividad minera sobre el medio ambiente?*

Como respuesta a la pregunta, se obtuvo que los principales efectos de la minería sobre el medio ambiente son los siguientes:

- Alteración del relieve natural
- Cambios en la topografía local
- Aumento de las probabilidades de ocurrencia de procesos geomorfológicos degradantes
- Incremento de la intensidad de los procesos erosivos
- Pérdida de materia orgánica
- Disminución de los niveles de humedad del suelo
- Cambios en las propiedades físico-química de los suelos
- Compactación de los suelos
- Cambios en la composición físico-química de las aguas de escurrimiento superficial
- Modificación del nivel piezométrico de las aguas
- Destrucción de la red de drenaje de las aguas superficiales y subterráneas
- Aumento de la insolación y la temperatura
- Aumento de los niveles de polvo sedimentable en el aire
- Incremento de los niveles de contaminación por gases de escape de los motores de combustión interna
- Contaminación sónica
- Tala de árboles y arbustos
- Destrucción de la cubierta vegetal
- Destrucción y fragmentación de hábitat de la flora, vegetación y fauna

- Destrucción de especies endémicas
- Afectación a la diversidad
- Migración de especies animales
- Destrucción de la microfauna
- Deterioro de la calidad del paisaje
- Cambio del uso del suelo (por ejemplo, de forestal a minero)
- Aumento del riesgo de enfermedades y molestias por la acción del polvo.
- Incremento de la red vial y eléctrica
- Modificación de la infraestructura de servicios
- Incremento del empleo fijo
- Incremento de las ganancias por la extracción y transportación de mineral
- Creación de empleos temporales
- Realización de inversiones.
- Incremento del valor del suelo
- Mejoras en las condiciones de vida de los trabajadores
- Incremento de las posibilidades de intervención de empresas de servicios

2.1.4 Determinación de la importancia del impacto

Se propone para calcular la Importancia Difusa de los impactos el uso de un Sistema de Computación con Palabras basado en aritmética difusa [21]. Se propone su utilización debido al alto costo computacional que tendría un sistema difuso basado en reglas; además se permite que cada grupo de expertos escoja su propio sistema para el cálculo de la importancia.

Cada impacto puede ser calculado con un sistema diferente, de esta forma cada grupo de expertos podrá emplear las variables que considere necesarias y definir las de forma independiente a los demás grupos. Los sistemas para el cálculo de la importancia de los impactos que se proponen tendrán las siguientes características:

1. La variable Naturaleza del Impacto no será considerada una variable de entrada y sólo será empleada en el Análisis Aproximado Global.
2. Cada variable de entrada podrá definirse sobre cualquier intervalo $[a, b]$ de la recta real, e internamente el sistema efectuará un cambio de escala al intervalo $[0,1]$.
3. La salida será la Importancia del Impacto, y estará representada en el intervalo $[0,1]$.

4. Las variables de entrada y de salida del sistema serán variables lingüísticas. Una variable lingüística es una variable que se representa con palabras en lugar de hacerlo con números, el significado de estas palabras se determina mediante conjuntos difusos.
5. La función de razonamiento aproximado del sistema será:

$$fra : y = \sum_{i=1}^n f_i w_i g_i(x_i) + \sum_{i=1}^n (1 - f_i) w_i g_i(i - x_i)$$

donde f_i es un parámetro que toma valor 0 ó 1 e indica si la salida es creciente o no con respecto a la variable i de entrada; w_i es el peso de la variable i en el cálculo de la importancia y es definido por el usuario (se recomienda que la suma de los pesos sea igual a 1), y además la función $g(x_i)$ es $g(x_i) = (x_i)^{\theta_i}$ donde θ_i es un exponente seleccionado por el usuario, se emplea $\theta_i=2$ como valor por defecto.

Encuestas: Importancia del Impacto

Con el objetivo de obtener una aproximación a los métodos utilizados por los expertos del territorio para calcular la importancia, fueron aplicadas dos encuestas al efecto, la primera para identificar los métodos de cálculo (Cuadro 2.4) y la segunda para conocer las variables que utilizan para caracterizar el impacto ambiental (Cuadro 2.5).

Del procesamiento de las encuestas se obtuvo que las variables que los expertos consideran más importantes para la caracterización de los impactos ambientales son la Intensidad y la Extensión, le siguen en importancia la Acumulación, el Momento y la Recuperabilidad, por lo que no deben ser obviadas en las valoraciones de los impactos ambientales. Además, los expertos señalaron en sus respuestas su consideración de tener en cuenta algunos parámetros o variables generales tales como: uso del agua, importancia del emplazamiento (área protegida, patrimonio cultural, etc.), si se afectan o no especies endémicas, entre otros.

En cuanto a los métodos utilizados para el cálculo de la importancia, los más utilizados son: para el cálculo de la importancia de los impactos, la suma ponderada de las variables (utilizada por todos) y para el cálculo de las importancias globales, la suma ponderada de las importancias y la media de las importancias (todos las utilizan indistintamente). La selección de la máxima (o mínima importancia) no la utilizan, pues todos coinciden en que los impactos que tienen valores de importancias muy altos son tratados independientemente, por lo que no son utilizados para el cálculo de las importancias globales; igualmente desechan los valores muy pequeños.

Cuadro 2.4 Encuesta para identificar los métodos de cálculo de la importancia del impacto

Métodos para el cálculo de la importancia de los impactos ambientales

1. ¿Qué métodos utiliza para el cálculo de la importancia de los impactos?
 - 1.1 Suma de las variables
 - 1.2 Suma ponderada de las variables
2. ¿Qué métodos utiliza para el cálculo de las importancias globales?
 - 2.1 Suma de las importancias
 - 2.2 Suma ponderada de las importancias
 - 2.3 Media de las importancias
 - 2.4 Valores máximo (o mínimo) de las importancias

Otras consideraciones:

Cuadro 2.5 Encuesta Identificación de las variables para el cálculo de la importancia del impacto

Variables para el cálculo de la importancia

1. ¿Qué variables tiene UD. en cuenta para la valoración de la importancia de los impactos ambientales? Evalúe la importancia que le concede a cada una de las variables seleccionadas, valores del 0 al 10.

Variable	Valoración
Naturaleza del Impacto	
Extensión	
Intensidad	
Momento	
Persistencia	
Recuperabilidad	
Efecto	
Periodicidad	
Reversibilidad	
Sinergia	
Acumulación	

 - b) Proponga si deben considerarse otras variables

Variable	Valoración

Otras consideraciones:

Funciones para el cálculo de la importancia del impacto

En concordancia con lo señalado anteriormente y considerando los resultados obtenidos del procesamiento de las encuestas, se propone para el cálculo de la importancia del impacto, al igual que en TDEIA, la utilización de un Sistema de Computación con Palabras basado en Aritmética Difusa. La variable importancia del impacto se encuentra definida en el intervalo [-1, 1] (figura 2.3), pues se tienen en cuenta los impactos que afectan negativamente al entorno, y aquellos que son beneficiosos para el mismo, en este sentido se considera la variable Naturaleza del Impacto.

En la tabla 2.1 se muestran las variables definidas para el cálculo de la importancia del impacto, al igual que las etiquetas lingüísticas y sus conjuntos difusos correspondientes.

La función de razonamiento aproximado propuesta para el sistema de computación con palabras, es la siguiente: $IMP = \sum_{i=1}^n f_i w_i g_i(x_i) + \sum_{i=1}^n (1 - f_i) w_i g_i(1 - x_i)$ evaluada de $[0, 1]^n$ en $[0, 1]$. La función $g(x) = x^r$, es una función de $[0,1]$ en $[0, 1]$ monótonamente creciente tal que $g(0) = 0$ y $g(1) = 1$, la función $g(x)$ con $r > 1$ sirve para subvalorar los valores bajos de x , mientras que la misma función con $r < 1$ sirve para sobrevalorar los valores bajos de x , es decir r representa que tan rápido crece la importancia de un efecto cuando crece la variable x . El término w_i representa el peso de cada variable, y se cumple que $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. Los pesos mayores son asignados a las variables de entrada que se consideran de mayor relevancia, en nuestro caso, las variables intensidad y extensión. El término f_i es un parámetro, referido a cada variable, que toma valor cero o uno: si la salida es monótonamente creciente con respecto a la variable de entrada, $f_i = 1$, y si es monótonamente decreciente, $f_i = 0$. En este caso la importancia es monótonamente decreciente con respecto a la variable de entrada Momento (tiempo).

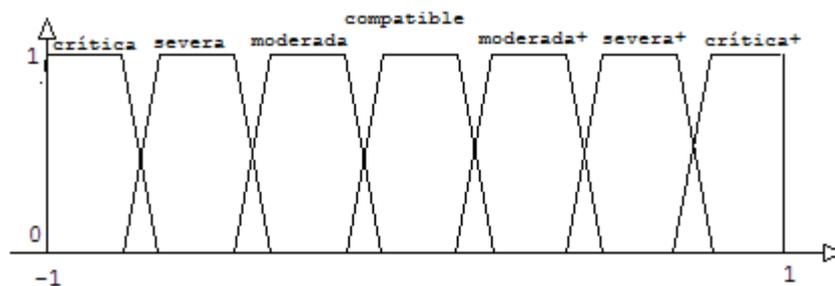


Fig. 2.3 Representación gráfica de la variable importancia

Tabla 2.1 Definición de la importancia de las variables en términos lingüísticos.

Variable	Rango	Peso	Etiquetas	Número Difuso
Intensidad	[0, 1]	3/13	Baja Media Alta Muy alta Total	(0.0,0.0,0.11,0.22) (0.11,0.22,0.33,0.44) (0.33,0.44,0.55,0.66) (0.55,0.66,0.77,0.88) (0.77,0.88,1.0,1.0)
Extensión	[0, 100]%	2/13	Puntual Parcial Extenso Total	(0,0,14,29) (14, 29,43,57) (43,57,71,86) (71,86,100,100)
Momento	[0, 1]	1/13	Largo Plazo Medio Plazo Inmediato	((0.0,0.0,0.2,0.4) (0.2,0.4,0.6,0.8) (0.6,0.8,1.0,1.0)
Persistencia	[0, 1]	1/13	Fugaz Temporal Permanente	(0.0,0.0,0.2,0.4) (0.2,0.4,0.6,0.8) (0.6,0.8,1.0,1.0)
Reversibilidad	[0, 1]	1/13	Corto Plazo Medio Plazo Irreversible	(0.0,0.0,0.2,0.4) (0.2,0.4,0.6,0.8) (0.6,0.8,1.0,1.0)
Sinergia	[0, 1]	1/13	Sin Sinergismo Sinérgico Muy Sinérgico	(0.0,0.0,0.2,0.4) (0.2,0.4,0.6,0.8) (0.6,0.8,1.0,1.0)
Acumulación	[0, 1]	1/13	Simple Acumulativo	(0.0,0.0,0.33,0.66) (0.33,0.66,1.0,1.0)
Efecto	[0, 1]	1/13	Indirecto Directo	(0.0,0.0,0.33,0.66) (0.33,0.66,1.0,1.0)
Periodicidad	[0, 1]	1/13	Irregular Periódico Continuo	(0.0,0.0,0.2,0.4) (0.2,0.4,0.6,0.8) (0.6,0.8,1.0,1.0)
Recuperabilidad	[0, 1]	1/13	Corto Plazo Medio Plazo Mitigable Irrecuperable	(0.0,0.0,0.14,0.29) (0.14,0.29,0.43,0.57) (0.43,0.57,0.71,0.86) (0.71,0.86,1.0,1.0)
Importancia	[-1, 1]		Crítica Severa Moderada Compatible o Irrelevante Moderada + Severa + Crítica +	(-1, -1, -0.846, -0.692) (-0.846, -0.692, -0.538, -0.385) (-0.538, -0.385, -0.231, -0.077) (-0.231, -0.077, 0.077, 0.231) (0.077, 0.231, 0.385, 0.538) (0.385, 0.538, 0.692, 0.846) (0.692, 0.846, 1.000, 1.000)

La variable Naturaleza del Impacto no es una variable de entrada de la función de razonamiento aproximado IMP, pero es utilizada en el procesamiento posterior de la salida de la función de razonamiento aproximado IMP, y entonces se obtiene el valor de la importancia del impacto. A la variable naturaleza del impacto se le asocia valor -1 si el impacto es perjudicial para el medio ambiente, y se le asocia valor 1 si es un impacto beneficioso.

El procesamiento de la salida de la función de razonamiento aproximado IMP con la naturaleza del impacto se muestra en la Tabla 2.2, donde la notación $T(a, b, c, d)$ representa un número difuso trapezoidal.

Tabla 2.2 Preprocesamiento de la Importancia según la Naturaleza del Impacto

Naturaleza del Impacto	Salida de la función IMP	Importancia del Impacto
Beneficioso	$T(a, b, c, d)$	$T(a, b, c, d)$
Perjudicial		$T(-d, -c, -b, -a)$
Indeterminado		$T(-d, -c, c, d)$

Cuando se tiene el valor de la importancia del impacto se realiza el proceso de aproximación lingüística, en el cual se le asocia la etiqueta correspondiente de la variable de salida. Para ello, se calcula la consistencia entre el conjunto difuso resultante importancia del impacto y cada uno de los conjuntos difusos asociados a las etiquetas lingüísticas de la variable importancia. Esta consistencia se interpreta como una medida de la posibilidad de que la importancia del impacto resultante tenga el significado de la etiqueta lingüística correspondiente. Este valor numérico se clasifica en los siguientes intervalos:

- Si la consistencia es mayor que $2/3$ es “muy posiblemente” la etiqueta que se analiza.
- Si la consistencia está entre $1/3$ y $2/3$ es “posiblemente”.
- Si la consistencia es menor que $1/3$ es “poco posiblemente”.
- Si la consistencia es igual a cero no se clasifica con la etiqueta en análisis.

Aunque se brinda a los expertos ambientales un conjunto de variables para la estimación de la importancia, sus pesos y las etiquetas utilizadas para su valoración, estos pueden agregar o eliminar variables, así como definir las etiquetas lingüísticas que las caracterizan y los números difusos asociados a cada una de ellas.

Análisis Aproximado Difuso Global

En esta etapa del proceso se determina si el proyecto es compatible o no con en Medio Ambiente, para ello se calculan algunos indicadores difusos. Estos indicadores se calculan con sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa, para los cuales las entradas son importancias difusas y la salida es un indicador difuso asociado a una variable lingüística. Estos sistemas no tienen un número fijo de entradas, lo cual depende del indicador a calcular así como del nivel en las jerarquías de acciones del proyecto y factores ambientales.

Los indicadores globales que utilizan los expertos ambientales en proyectos mineros son los siguientes: Importancia Media, Importancia Relativa al Entorno e Importancia Ponderada. En la tabla 2.3 se presentan las funciones de razonamiento aproximado que utilizan los sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa para el cómputo de estos indicadores globales.

Tabla 2.3 Indicadores Difusos Globales

Indicador	Función de Razonamiento Aproximado
Importancia Media	$fra : y = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i$
Importancia Relativa al Entorno	$fra : y = \sum_{i=1}^q P_i x_i$
Importancia Ponderada	$fra : y = \frac{\sum_{i=1}^q P_i x_i}{\sum_{i=1}^q P_i}$

2.2 VALORACIÓN DETALLADA

Esta es la etapa equivalente a la fase Valoración Cuantitativa de la metodología crisp y tiene como objetivo final la determinación del Valor del Impacto Total. Para ello se proponen varios sistemas de computación con palabras usando aritmética difusa para el cálculo de la Magnitud Total por Factor, la Calidad Ambiental Neta por Factor, el Valor del Impacto Total por Factor, y el Valor del Impacto Total del Proyecto.

2.2.1 Indicadores ambientales

El paso inicial de esta etapa es la identificación de los indicadores ambientales que serán utilizados en la valoración de la calidad ambiental de los factores ambientales. Para ello se realizó una encuesta a los expertos ambientales del territorio que permitió identificar los indicadores ambientales que se utilizarían para la medición de cada factor ambiental (Cuadro 2.6). Para la selección de los indicadores ambientales se siguieron los criterios siguientes ([10], [29], [38]):

- Los indicadores son medibles y posibles de analizar en series temporales (deben reflejar la evolución en el tiempo), de forma que puedan analizarse para prevenir o corregir tendencias negativas.
- El número de indicadores es reducido.
- Los indicadores están relacionados con los objetivos, convirtiéndose en herramientas de gestión que permiten fijar responsabilidades a los agentes que intervienen en la formulación y aplicación de políticas ambientales.
- Los indicadores cuantifican la afectación de los factores, y dan una medida de la calidad del factor.
- Los indicadores son exactos, inequívocos y específicos.
- Los indicadores son comprensibles y fáciles de interpretar.
- Son significativos y relevantes: Representan la realidad de un sistema para poder actuar en consecuencia.
- Son sensibles a los cambios, pues solo así se podrá evaluar de una manera rápida, sencilla y continua el desarrollo de las actuaciones ambientales
- Son válidos, científicamente solventes, verificables y reproducibles
- Son herramientas útiles para la acción. Como conjunto deben poder proporcionar una visión rápida de la situación del medio ambiente.

Los indicadores ambientales, además, fueron seleccionados según los factores ambientales a los que se les mide la calidad, teniendo en cuenta los impactos que afectan a cada uno de los mismos.

Cuadro 2.6 Encuesta Indicadores Ambientales

Indicadores Ambientales

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?

Factor Ambiental	Indicador(es) para el Factor Ambiental
Geología y Geomorfología	
Suelo	
Aguas terrestres	
Océano	
Clima	
Aire	
Flora y vegetación	
Fauna	
Relaciones ecológicas	
Paisaje	
Uso del suelo	
Población	
Infraestructura	
Economía	
Patrimonio histórico, arqueológico y cultural	

Tras el procesamiento de las respuestas dadas por los expertos, los indicadores ambientales identificados por factor fueron los siguientes:

❖ Aire

1. Concentración de Monóxido de carbono (CO)
2. Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NO₂)

3. Concentración de Dióxido de Azufre (SO₂)
4. Material particulado (PM₁₀, PM₂₅, Polvo)
5. Ruido
- ❖ Aguas terrestres
 6. Partículas en suspensión
 7. Turbidez
 8. Ph
 9. Temperatura
 10. Red de drenaje afectada
 11. Nivel piezométrico
- ❖ Océano
 12. Temperatura
 13. Turbidez
- ❖ Suelo
 14. Nivel de compactación
 15. Superficie erosionada
 16. Nivel de humedad
 17. Espesor de capa fértil
 18. Salinidad
 19. Ph
- ❖ Clima
 20. Temperatura media
 21. Cantidad de precipitaciones
- ❖ Flora y Vegetación
 22. Diversidad
 23. Especies amenazadas

24. Cantidad de árboles observables

25. Superficie cubierta

❖ Fauna

26. Especies amenazadas

27. Diversidad

28. Movilidad de especies

❖ Paisaje

29. Cantidad de árboles observables

30. Calidad visual

31. Calidad del paisaje

❖ Uso del suelo

32. Uso del suelo

❖ Población

33. Salud e higiene

34. Nivel de empleo

❖ Infraestructura

35. Nivel de afectación por construcción de redes eléctricas

36. Nivel de afectación por construcciones

❖ Economía

37. Nivel de empleo

38. Incremento de los ingresos

39. Nivel de inversiones

40. Valor del suelo

❖ Geología y Geomorfología

41. Carácter del relieve

42. Superficie erosionada

❖ Patrimonio histórico, arqueológico y cultural

43. Nivel cultural

44. Valores históricos

Posteriormente, en entrevista con los especialistas, se obtuvieron las unidades de medida de los indicadores ambientales y entre qué valores oscilan sus mediciones, y además cuáles son las funciones de transformación que utilizan para la valoración de la calidad ambiental. En el anexo III se muestran las funciones de transformación de los indicadores escogidos.

2.2.2 Magnitud del impacto, Calidad Ambiental y Valor Ambiental

Los pasos a seguir durante la Valoración Detallada son los siguientes:

1. Los expertos deben determinar el estado de cada factor ambiental F_i sin el proyecto, consignando el valor (puede ser un número crisp, un intervalo, un número difuso, o una palabra) que toma el indicador del factor antes del proyecto en la variable Magnitud del factor F_i sin el proyecto ($M_{\text{sin-}i}$), expresándolo en las unidades propias del factor.
2. Los expertos determinan la magnitud del impacto de la acción A_j sobre el factor F_i , (M_{ij}), y lo reflejan en las unidades propias del indicador del factor; el valor de M_{ij} puede ser un número crisp, un intervalo, un número difuso, o una palabra.
3. Se obtiene la Magnitud Total del Factor F_i con el proyecto ($M_{\text{con-}i}$) para cada factor, para ello se agregan las magnitudes M_{ij} correspondientes a ese factor utilizando un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa.
4. Se obtiene la Calidad Ambiental del Factor F_i con el proyecto ($CA_{\text{con-}i}$) y la Calidad Ambiental del Factor F_i sin el proyecto ($CA_{\text{sin-}i}$) para cada factor. Para el cálculo de $CA_{\text{con-}i}$ y $CA_{\text{sin-}i}$ se utiliza un sistema de computación con palabras, que tiene como entradas $M_{\text{con-}i}$ y $M_{\text{sin-}i}$ respectivamente.
5. Se calcula la Calidad Ambiental Neta del Factor F_i ($CA_{\text{net-}i}$) para cada factor, utilizando un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa para el que las entradas son $CA_{\text{con-}i}$ y $CA_{\text{sin-}i}$.

6. Se obtiene el Valor del Impacto ambiental sobre el Factor F_i (V_i) para cada factor a partir de la $CA_{\text{neto-}i}$ en un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa.
7. A partir de los V_i obtenidos se calcula el Valor del Impacto Ambiental Total sobre el Entorno (IAT) mediante un sistema de computación con palabras basado en aritmética.

Los sistemas de computación con palabras que se propone se utilicen en esta fase de la metodología difusa de evaluación de impacto ambiental son similares a los mostrados en la sección 1.3.2.

2.3 MEDIDAS CORRECTORAS

La metodología difusa permite proponer la selección de medidas correctoras, que deberán tomarse para poder aprobar un proyecto, tomando como base la valoración aproximada. La caracterización de las medidas correctoras se realiza mediante la estimación de la importancia del impacto corregido, es decir, se calcula cómo debe ser la importancia de un conjunto de impactos individuales para que la importancia del impacto esté dentro de los límites aceptables, el indicador difuso Importancia Media será el que se utilizará para la estimación de las medidas correctoras (ver sección 1.3.2). Debe notarse que corresponde al grupo de expertos determinar si es técnica y económicamente posible realizar las correcciones necesarias.

El indicador Importancia Media, se obtiene durante la valoración aproximada por medio de sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa, por lo que se efectuará razonamiento inverso para obtener una caracterización de las medidas correctoras empleando el algoritmo de Extensión Necesaria ([21], [22]).

Además se pretende ayudar a los expertos a decidir qué medida correctora puede ser aplicada en un momento dado.

Para ello se propone tener un repositorio de medidas correctoras, que cuente además con información de los impactos ambientales que mitiga. Así como, de ser posible, una valoración de los resultados de su aplicación en diferentes proyectos.

Inicialmente se propone realizar un repositorio de medidas correctoras, que contenga además los impactos que mitigan.

Para conocer qué medidas proponen los expertos para mitigar los impactos ambientales que produce la minería sobre el medio se les hizo la siguiente pregunta: *¿Qué medidas propone usted para mitigar los impactos que produce la actividad minera sobre el medio ambiente?*

Como respuesta a la pregunta se obtuvo:

Medidas Correctoras

- Creación de viveros con plantas autóctonas
- Utilización de los recursos maderables extraídos de las futuras áreas mineras
- Acondicionamiento de drenajes
- Construcción de bancales y terrazas para mitigar la erosión por escurrimiento
- Creación de pantallas vegetales
- Descompactación de los suelos
- Diseño y construcción de depósitos de agua
- Diseño y restauración de taludes
- Eliminación de metales pesados de las aguas
- Estabilización de la superficie
- Realización de mejoras edáficas en los terrenos minados
- Remodelación topográfica
- Restauración de cavidades mineras
- Restauración de escombreras
- Restauración de los suelos
- Reutilización de estériles
- Revegetación con especies vegetales autóctonas
- Siembra de gramíneas
- Cubrir las salas de compresores con cubiertas de hormigón
- Instalación de silenciadores en los equipos móviles
- Limitar el trabajo de las unidades ruidosas a horas diurnas

- No afectar la franja de protección de ríos, arroyos u otras zonas no incluidas en el proyecto
- Realizar estudios detallados de la flora y la fauna
- Reducción de la pendiente de taludes de vertederos y excavaciones
- Reducción de la velocidad de los vehículos
- Selección y extracción de semillas y plantas de especies endémicas
- Cumplimiento de las medidas de seguridad industrial y personal
- Educación ambiental

Estas son medidas generales que pueden ser adaptadas a los requerimientos de cada proyecto particular, este conjunto de medidas puede ser ampliado y enriquecido.

Luego se pregunto a los expertos acerca de sus criterios en cuanto a la aplicación o no de las medidas correctoras. Ellos se basan en la clasificación de los impactos ([9], [18], [47]):

1. Impacto Compatible: no precisa la aplicación de medidas correctoras, habrá recuperación inmediata.
2. Impacto Moderado: la recuperación requiere cierto tiempo, es aconsejable la aplicación de medidas correctoras.
3. Impacto Severo: la magnitud del impacto exige, para su recuperación, la introducción de medidas correctoras.
4. Impacto Crítico: la magnitud del impacto es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente de la calidad de las condiciones ambientales, sin la posible recuperación de dichas condiciones. Es poco factible la introducción de medidas correctoras.

Es por ello, que luego de valorar los impactos ambientales según su clasificación se decide si deben ser aplicadas o no medidas correctoras, y se selecciona cuáles pueden ser las posibles medidas mitigadoras y protectoras del proyecto. Una vez que se han identificado las medidas correctoras, se realiza un rediseño a fin de poder evaluar su costo y así determinar su viabilidad técnica y económica, aspectos de mucho peso pues son los elementos fundamentales en la decisión de aplicar o no una medida correctora determinada.

2.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN EL YACIMIENTO MINERO PUNTA GORDA

En los inicios de la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, la protección medioambiental no constituía un elemento de máxima prioridad para la minería, originándose en la zona afectaciones ambientales severas. La rehabilitación minera no se realizaba paralelamente a la extracción, por lo que los problemas ambientales se agravaron.

La extracción del mineral en el yacimiento Punta Gorda se realiza a cielo abierto, considerada por muchos una de las actividades industriales que provoca mayores impactos ambientales. Las actividades fundamentales que se realizan son las siguientes: desbroce, que es la eliminación de la cubierta vegetal; destape, que consiste en el corte y traslado del horizonte superior (escombro) del cuerpo mineral; construcción de caminos; montaje de líneas eléctricas; drenaje, actividad necesaria para reducir la humedad del mineral debido a las condiciones hidrogeológicas difíciles de este yacimiento; extracción y transporte del mineral; y rehabilitación minera. [15]

El área del yacimiento cuenta con una red hidrológica de importancia, pero con un marcado deterioro de la calidad de las aguas (abundantes partículas en suspensión, aguas turbias, etc.), con repercusiones ecológicas en la flora y la fauna. [15]

La mayoría de las áreas comprendidas en el yacimiento no poseen suelo, perdiendo en su totalidad su potencialidad como soporte y fuente de nutrientes; en las áreas donde aún existe, este posee grados significativos de contaminación, producto del arrastre de partículas por el agua y por la deposición de polvo. [15]

En la zona del yacimiento, el aire está contaminado fundamentalmente por las emisiones producto del tráfico de vehículos vinculados al proceso de explotación. [15]

La destrucción de la cubierta vegetal trae aparejado la pérdida de ecosistemas, reducción o pérdida de la biodiversidad, migración de especies animales, entre otros impactos ambientales negativos. [15]

La actividad minera en el territorio causa graves daños sobre el entorno, por lo que existe en la actualidad una degradación ambiental importante en el área. Se hace necesaria la realización de estudios ambientales, que propicien una adecuada planificación ambiental del territorio y que sean económicamente sustentables.

En el presente apartado se muestra un resumen de la aplicación de la metodología a un caso de estudio. En [76] se muestra una descripción completa de la aplicación de esta metodología al caso de estudio seleccionado.

2.4.1 Valoración Aproximada

Identificación de los factores ambientales

La jerarquía de identificación de los factores ambientales utilizada es la siguiente:

- Entorno (Sistema Ambiental)
- Sistemas Ambientales
- Subsistemas Ambientales
- Factores Ambientales
- Impactos Recibidos

Para la asignación de UIP se consultó con los expertos del territorio, de la universidad de Moa y algunos especialistas de las empresas, y a través de encuestas se calculó la importancia de cada factor ambiental y luego a los impactos de cada factor se le asignó el mismo porcentaje de unidades de importancia relativa al entorno. En la Tabla 2.4 se muestra esta jerarquía hasta el nivel Subsistemas Ambientales.

Identificación de las acciones del proyecto

Para identificar las acciones del Proyecto se realizó la siguiente jerarquía (Tabla 2.5):

- Proyecto
- Actividad
- Acción

Tabla 2.4 Jerarquía de Factores Ambientales y unidades de importancia asignadas

	Unidades de Importancia (%)
Medio Ambiente: Entorno	100
Sistema Ambiental SA1: Medio Físico	80
<i>Subsistema Ambiental SS1: Medio Inerte</i>	50
<i>Subsistema Ambiental SS2: Medio Biótico</i>	20
<i>Subsistema Ambiental SS3: Medio Perceptual</i>	10
Sistema Ambiental SA2: Medio Socioeconómico	20
<i>Subsistema Ambiental SS4: Medio Sociocultural</i>	15
<i>Subsistema Ambiental SS5: Medio Económico</i>	5

Tabla 2.5 Acciones del proyecto

Proyecto: Yacimiento Punta Gorda
Actividad A1: Apertura
Acción AC1: Trabajos Topográficos
Acción AC2: Trabajos de Perforación Geológica
Acción AC3: Desbroce
Acción AC4: Construcción de Vía de Acceso
Acción AC5: Escombreo
Actividad A2: Operación
Acción AC6: Extracción del Mineral
Acción AC7: Transporte de Maquinarias y Equipos
Acción AC8: Transporte de Mineral
Acción AC9: Mantenimiento de Caminos
Actividad A3: Abandono
Acción AC10: Rehabilitación de las Áreas Minadas

Determinación de la Importancia de los Impactos

El cálculo de la importancia del impacto fue hecho siguiendo las indicaciones dadas en la sección 2.1.4. Las variables lingüísticas utilizadas para la caracterización de la importancia son las mostradas en la tabla 2.1. De igual forma, la variable importancia del impacto se encuentra definida en el intervalo $[-1, 1]$, pues se tienen en cuenta los impactos que afectan negativamente al entorno, y aquellos que son beneficiosos para el mismo, en este sentido se considera la variable Naturaleza del Impacto.

Para el cálculo de la importancia se utilizó la función de razonamiento aproximado IMP con los datos de la EIA crisp realizada previamente [46], pero esta vez se utilizaron las etiquetas lingüísticas correspondientes a los valores posibles de cada variable.

Utilizando el software TDEIA desarrollado en [21] se ha calculado la Importancia Media de los impactos que produce cada acción.

Para conocer cómo se afectan los factores ambientales involucrados en el proyecto, se realizó el análisis aproximado difuso global. Se calculó el indicador difuso Importancia Media (*imp*), que tuvo como entradas importancias I_{ij} donde i es un Impacto Recibido que tiene como padre en la jerarquía al factor ambiental analizado y j es una acción del proyecto.

El cálculo de la Importancia Media se realizó de la siguiente manera: primeramente se conforma el vector IM compuesto por elementos de la forma I_{ij} , donde i representa los Impactos Recibidos por el factor ambiental analizado, y j representa la acción del proyecto

que produce el impacto i sobre el factor analizado (denotaremos los elementos del vector IM por x_k); luego se calculó el indicador Importancia Media, utilizando la fórmula:

$$imp = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q x_k$$

donde q representa la cantidad de elementos del vector IM.

En la Tabla 2.6 se muestran los valores de la Importancia del impacto recibido por los factores ambientales, después de realizar la evaluación de impacto ambiental difusa.

Como puede observarse en la Tabla 2.6, los factores ambientales Geología y Geomorfología, Flora y Vegetación, y Paisaje, reciben impactos cuya importancia es clasificada como severa (interpretación resumida), y se desea que los factores ambientales sólo reciban impactos de moderados a compatibles, por lo que se hace necesario la utilización de medidas para corregir estos efectos negativos. Por otro lado los factores ambientales Economía y Uso del Suelo reciben impactos beneficiosos, por lo que su estado mejora notablemente con el desarrollo del proyecto.

Los resultados obtenidos con la metodología difusa contienen a aquellos obtenidos por la metodología crisp. Además, con la metodología difusa se modela la incertidumbre incluida en los conceptos utilizados para la valoración de las variables que son empleadas en el cálculo de la importancia, por lo cual con esta metodología se obtienen resultados más coherentes, en el sentido que ofrece una gama de posibles valores para la importancia, con diferentes grados de posibilidad de ocurrencia.

2.4.2 Valoración Detallada

La magnitud del impacto para cada pareja acción-factor, medida en unidades heterogéneas, debe ser transformada a unidades homogéneas. Para ello se emplea la técnica de las funciones de transformación, constituyendo así la Matriz de Magnitudes. Para valorar la magnitud se definió una variable lingüística con las etiquetas: *Baja*, *Media*, *Alta*; teniendo en cuenta la opinión de los expertos en Medio Ambiente que laboran en la zona.

El estudio de EIA realizado previamente basado en la metodología crisp [46], omite varios aspectos que son necesarios para la realización del mismo estudio utilizando la metodología difusa, tal es el caso de los indicadores ambientales.

Tabla 2.6 Importancia de los impactos recibidos por los factores ambientales

Factores Ambientales	Importancia del Impacto	
	Interpretación Ampliada	Interpretación Resumida
Geología y geomorfología	Posiblemente (0.36) Crítica muy posiblemente (1.00) Severa muy posiblemente (0.97) Moderada	Severa
Suelo	Posiblemente (0.46) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.89) Compatible	Moderada
Aguas	Posiblemente (0.59) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.72) Compatible	Moderada
Clima	Poco posiblemente (0.16) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Compatible	Moderada
Aire	Poco posiblemente (0.20) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Compatible	Moderada
Flora y vegetación	muy posiblemente (1.00) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada Posiblemente (0.35) Compatible	Severa
Fauna	muy posiblemente (0.97) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada poco posiblemente (0.30) Compatible	Moderada
Paisaje	Poco posiblemente (0.23) Crítica muy posiblemente (1.00) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada poco posiblemente (0.21) Compatible	Severa
Uso del suelo	muy posiblemente (0.70) Moderada + muy posiblemente (1.00) Severa + muy posiblemente (0.73) Crítica +	Severa +
Población	Poco posiblemente (0.22) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.88) Compatible	Moderada
Infraestructura	muy posiblemente (0.67) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada Posiblemente (0.44) Compatible	Moderada
Economía	muy posiblemente (0.92) Moderada + muy posiblemente (1.00) Severa + poco posiblemente (0.30) Crítica +	Severa +

En entrevistas con especialistas de la universidad y la empresa se obtuvieron indicadores ambientales de los cuales se conoce que son medibles, en qué unidades y entre qué valores oscilan sus mediciones, y sus funciones de transformación. Los indicadores seleccionados, se refieren a los impactos que representan el último nivel de la jerarquía de factores ambientales. En la Tabla 2.7 se listan los indicadores ambientales utilizados y en la figura 2.4 se muestran algunas de las funciones de transformación utilizadas. Para más detalles de las funciones de transformación utilizadas consultar el anexo III.

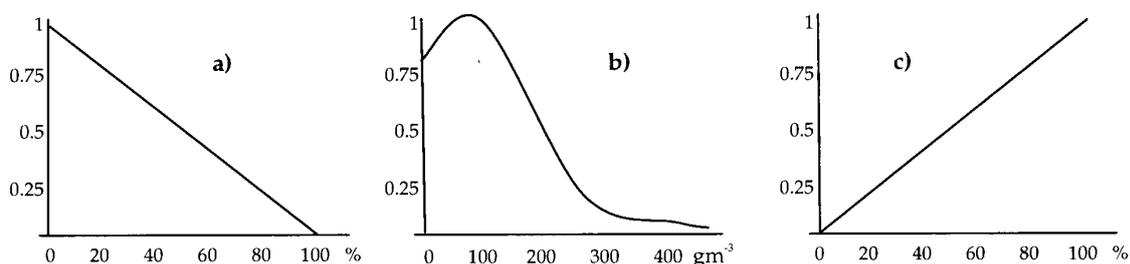


Fig. 2.4 Funciones de Transformación de algunos indicadores ambientales: a) Superficie erosionada, b) Material particulado, c) Salud e higiene

Con estos indicadores para los componentes del último nivel de la jerarquía de factores ambientales, Impactos, se estableció la magnitud de los mismos antes y después de la ejecución del proyecto. Se calculó la Calidad Ambiental Neta por impacto producido y luego el valor del impacto por factor (utilizando los términos β , ϕ , y φ , recomendados por la metodología difusa), lo que nos reportó la información de la Tabla 2.8. La variable Valor del Impacto se definió como una variable lingüística con cinco etiquetas: *Muy Malo*, *Malo*, *Normal*, *Bueno*, *Muy Bueno*.

La valoración detallada reporta que los factores más afectados negativamente son Geología y Geomorfología, Flora y Vegetación, y Paisaje; y que los factores que resultan más beneficiados son Uso del Suelo y Economía; en este caso ocurre lo mismo en la valoración aproximada, pero no siempre tiene que ocurrir así.

Tabla 2.7 Indicadores Ambientales

Indicador Ambiental	Unidad de Medida
Carácter del relieve	Metro
Superficie erosionada	Por ciento (%)
Partículas sólidas en aire (concentración media en 24 horas)	Mg/m ³
Nivel de contaminación por Monóxido de Carbono	p.p.m
Niveles de ruido	Decibelios (dBA)
Espesor de la capa fértil	Por ciento (%)
Nivel de humedad de los suelos	Por ciento (%)
Nivel de compactación de los suelos	Por ciento (%)
Pendiente por superficie de terreno afectada	Por ciento (%)
Nivel de salinidad del suelo	Por ciento (%)
Turbidez	Unidades Jacksons
Nivel piezométrico de las aguas subterráneas	Metro
Porcentaje de la red de drenaje	Por ciento (%)
Temperatura	Grados Celcius
Cantidad de árboles observables	Estimativa
Vegetación natural terrestre	Por ciento (%)
Especies amenazadas	Valores del 0 al 10
Diversidad de la flora	Por ciento (%)
Movilidad de especies	Por ciento (%)
Diversidad de especies	Número de especie por miles de individuos
Uso del suelo	Por ciento (%)
Infraestructura eléctrica	Por ciento (%) Valores del 0 al 30
Salud e higiene	Por ciento (%)
Nivel de empleo	Por ciento (%)
Incremento de los ingresos	Miles de dólares
Nivel de inversiones	Miles de dólares
Suelo afectado revalorizable	Por ciento (%)
Incremento de los ingresos de los trabajadores	Pesos
Actividades económicas beneficiadas	Por ciento (%)

Tabla 2.8 Valor del Impacto ambiental por factor ambiental

Factor Ambiental	Valor del Impacto	Factor Ambiental	Valor del Impacto
Geología y Geomorfología	Malo	Fauna	Normal
Suelo	Normal	Paisaje	Malo
Aguas	Normal	Uso del suelo	Bueno
Clima	Normal	Población	Normal
Aire	Normal	Infraestructura	Normal
Flora y vegetación	Malo	Economía	Bueno

2.4.3 Medidas correctoras

La adopción de medidas correctoras en los estudios ambientales atenúa o eliminan los efectos negativos del proyecto, lo cual constituye una etapa muy importante en la evaluación de los impactos ([9], [33], [47]).

La EIA clásica realizada, prevé un conjunto de medidas de corrección, prevención y mitigación con el objetivo de atenuar el impacto del mismo [46]. La ejecución de la mayoría de estas medidas tiene lugar en la acción del proyecto Rehabilitación Minera; por lo que se propone, teniendo en cuenta la valoración de los expertos ambientales, que sean las importancias de los efectos que se producen durante la realización de esta acción los que se modifiquen.

Los factores ambientales para los cuales se consideró la aplicación de medidas correctoras son aquellos que durante la Valoración Aproximada resultaron los más impactados negativamente: Geología y Geomorfología, Flora y Vegetación, y Paisaje.

Para el procesamiento de las medidas correctoras con el software TDEIA, desarrollado en [21], fueron necesarios los siguientes datos: Importancia Media del impacto recibido por el factor ambiental, Importancia Media deseada para el factor ambiental, y el efecto que puede ser modificado. Con el software, se calcula el valor que debe tomar la importancia del efecto modificable, así como la importancia media del factor ambiental. Estos nuevos datos le sirven a los expertos ambientales para tomar la decisión final, sobre si puede modificarse o no el efecto seleccionado hasta obtener la importancia corregida, o que acciones tomar al respecto.

Las medidas correctoras fueron procesadas con el software TDEIA y se obtuvo que la importancia de los efectos de la acción del proyecto Rehabilitación Minera sobre los factores ambientales Geología y Geomorfología, Flora y Vegetación, y Paisaje debe ser Muy Posiblemente (1.00) Crítica + para que el impacto sobre estos factores sea menor, sin embargo este resultado ya estaba incluido entre los posibles valores de importancia de la acción sobre estos factores del entorno.

Nuevamente estos resultados fueron consultados con expertos en EIA para analizar si era viable la modificación de la acción Rehabilitación Minera, la modificación de otras acciones del proyecto con incidencia en los factores ambientales afectados, o la inclusión de nuevas acciones al proyecto.

Para la consulta con los expertos se utilizó el Método Delphy ([44], [54], [55], [72]), se le realizaron varias rondas de encuestas, de forma anónima e individual, en las que se hicieron preguntas referentes a las medidas correctoras, tales como: en qué medida pueden modificarse los impactos provocados sobre los factores ambientales analizados, qué Ud. propone para mitigar los efectos sobre los factores ambientales analizados, entre otras. Fueron consultados 15 expertos de empresas productoras y de la universidad, que fueron seleccionados por grado de competencia, teniendo en cuenta su experiencia como evaluadores de impacto ambiental.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Geología y Geomorfología: Es prácticamente imposible mejorar la importancia del resto de los impactos sobre este factor y plantean que no se incluyan nuevas acciones al proyecto.
- Flora y Vegetación: Se plantea la adición nuevas acciones al proyecto, estas son:
 - Aviverar semillas de plantas endémicas: Esta acción se realizaría en la etapa de Apertura del proyecto. Es una acción de un impacto positivo sobre el factor.
 - Siembra de plantas endémica: Esta acción se realizaría en la etapa de Abandono del proyecto, y es una acción de impacto positivo sobre el factor.
- Paisaje: Se plantea la inclusión de nuevas acciones al proyecto que mejoren la calidad del paisaje, tales como:
 - Revegetación
 - Remodelación de la superficie
 - Creación de cuerpos de agua

Con estas nuevas acciones en el proyecto, se reanalizó la importancia de los efectos sobre los distintos factores ambientales (utilizando el software TDEIA) y se comprobó que para los factores Flora y Vegetación y Paisaje los impactos son menores siendo la importancia de los mismos Moderada; y el proyecto tiene un impacto sobre el entorno Compatible.

Con el procesamiento de las medidas correctoras con el software TDEIA, se obtuvo como resultado la adición de nuevas acciones al proyecto y que aquellos factores que con el proyecto inicial eran impactados negativamente reciban impactos de moderados a compatibles.

Esta metodología difusa aporta mejoras notables al proceso de Evaluación de Impacto Ambiental para la minería en Moa. La utilización de técnicas difusas facilita la representación de la subjetividad, se manipula la incertidumbre presente en las predicciones de una manera coherente. Además se brindan resultados más comprensibles para los decisores.

Capítulo 3

Evaluación en el Tiempo del Impacto Ambiental

Durante el desarrollo o ejecución de un proyecto las características del medio ambiente cambian, es decir, el entorno del emplazamiento del proyecto y sus alrededores pasan por distintas condiciones o estados y por tanto, la manifestación de los impactos ambientales también varía con el paso del tiempo.

La mayoría de las metodologías tradicionales de EIA reconocen el cambio de los impactos ambientales en el tiempo, pero estos cambios son analizados de forma simplificada. Tal como se muestra en el Capítulo 1 (apartado 1.2.1 sección *Determinación de la importancia de los impactos*), en lugar de considerar valores variables en el tiempo se califica la variabilidad con conceptos tales como: permanencia y periodicidad.

Algunos expertos consultados han destacado la necesidad de contar con métodos y herramientas que permitan hacer predicciones de la variación de los impactos ambientales durante el tiempo de vida de un proyecto determinado², lo que es especialmente importante en determinados tipos de actividad, como la Minería.

² “Las zonas en las que se encuentran emplazadas yacimientos mineros sufren gran afectación medioambiental, dada las características de las acciones que se ejecutan en este tipo de proyectos. Teniendo en consideración el alto impacto ambiental de esta actividad, es necesario realizar evaluaciones periódicas en estas áreas, sin embargo aún no se cuenta con herramientas fiables que permitan hacer predicciones de los impactos ambientales a lo largo del proyecto con el fin de tomar las decisiones más acertadas en cada caso”

Opinión de experto ambiental del Centro de Estudios del Medio Ambiente del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

La evaluación de impacto ambiental tradicional es válida para proyectos cuyo fin es predecible a corto y mediano plazo, es decir, proyectos que duran hasta cinco años aproximadamente, puesto que contando con la experiencia de los expertos ambientales puede hacerse una predicción, que aunque subjetiva, tiene un bajo nivel de imprecisión.

Sin embargo, para el caso de proyectos de larga duración, cuya función fundamental se extiende en el tiempo, este tipo de predicciones no sería acertado, pues se introduciría un nivel muy alto de ambigüedad.

Un ejemplo de este tipo de proyectos, es la explotación de un yacimiento minero, en el cual se realizará la extracción de mineral hasta que se agote el yacimiento. Es decir, se realizará una etapa inicial de apertura (que durará un tiempo), y luego comenzará la etapa de operación en el yacimiento cuya finalización se prevé lejana.

Para este tipo de proyectos resultaría interesante realizar evaluaciones periódicas que permitan predecir la evolución del entorno del emplazamiento.

Si el mismo análisis es hecho desde la valoración cuantitativa, esta carencia la resuelven los expertos ambientales a través de los planes de monitoreo ambiental. La ejecución del plan de monitoreo ([14], [32], [40]) supone una revisión permanente de la actuación ambiental.

El monitoreo ambiental es por naturaleza una actividad a largo plazo y fundamental para describir el estado del ambiente y sus tendencias. Es un instrumento importante para el seguimiento de medidas y obras implementadas, y para la determinación del impacto de las mismas sobre el ambiente.

Sin embargo, dado que los planes de monitoreo ambiental comprenden prolongados periodos de tiempo y el aumento del costo del proyecto, son implementados sólo para los factores ambientales más afectados. No se hace un análisis global de la situación ambiental.

Como respuesta a esta situación, se presenta en este capítulo una metodología para el seguimiento de la evolución en el tiempo del impacto ambiental (sección 3.2). Esta metodología tiene como objetivos identificar las variaciones (tanto negativas como positivas) que se produzcan en el entorno durante la ejecución del proyecto, conocer el estado del Medio Ambiente, comprobar la efectividad de las medidas correctoras, y así valorar la necesidad de introducir cambios al plan de ejecución del proyecto.

Este método de seguimiento a la evolución del impacto ambiental está centrado fundamentalmente en los aspectos siguientes:

1. Establecimiento de periodos de valoración o evaluación del impacto ambiental
2. Predicción del impacto ambiental para los momentos predefinidos
3. Valoración del impacto ambiental en los momentos predefinidos y ajuste de las predicciones para momentos posteriores.
4. Valoración de la efectividad de las medidas correctoras en cada momento predefinido y ajuste de las medidas correctoras.

3.1 VALORACIÓN DEL TIEMPO EN LAS METODOLOGÍAS DE EIA TRADICIONALES

En esta sección se presenta cómo se consideran los cambios del impacto ambiental en el tiempo con las metodologías de EIA tradicionales. Se tomará como referencia la metodología presentada por Vicente Conesa [18], considerando que es una generalización de otras metodologías similares y que además incluye elementos tanto cualitativos (valoración de la importancia del impacto a través de variables que lo caracterizan) como cuantitativos (valoración de la magnitud del impacto tomando como referencia indicadores ambientales y la estimación de la calidad ambiental).

En la evaluación de impacto ambiental tradicional se reconoce que con el paso del tiempo y la ejecución de una acción de efectos negativos, la calidad ambiental va disminuyendo (ver figura 3.1). Al comparar cómo evolucionaría el entorno con la actuación humana (ejecución del proyecto o actividad) y cómo evolucionaría sin esta, se realiza una predicción de la afectación al medio en un momento futuro determinado (t_c).

En la metodología propuesta en [18] esta predicción se realiza a partir de la caracterización del impacto ambiental identificado, teniendo en cuenta un conjunto de variables cualitativas, como se presenta en el Capítulo 1, sección 1.2.1.

De las variables utilizadas para la caracterización del impacto (ver Cuadro 1.1), existen tres en las que está explícito el elemento tiempo de manera directa, que son:

- Momento (MO): Plazo de manifestación del impacto, se refiere al tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre un factor ambiental determinado. Generalmente se expresa en años y pueden ser diferenciados tres tipos de impactos, los de aparición inmediata, a medio plazo y a largo plazo. Los

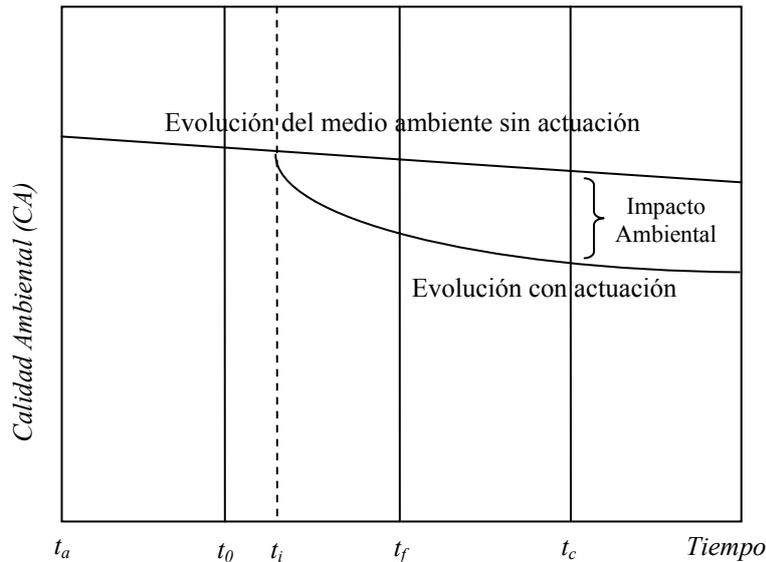


Fig. 3.1 Impacto Ambiental. t_a : momento actual, t_0 : momento de inicio de la acción, t_i : momento de inicio del impacto, t_f : momento de finalización de la acción. Adaptado de Conesa, 1997.

primeros son aquellos en los que el tiempo que transcurre desde el comienzo de la acción y la aparición de los efectos es nulo (ver figura 3.2 a); los impactos a medio plazo y a largo plazo se manifiestan al cabo de cierto tiempo luego de iniciadas las actividades; si el tiempo es menor que tres años se considera a medio plazo, y a largo plazo si el tiempo es mayor que tres años (ver figura 3.2 b). Además, se valora si el momento de manifestación del impacto es crítico, es decir, si el momento en que tiene lugar la acción es impactante en extremo. Para la valoración de la variable Momento se utilizan las etiquetas: Inmediato, Medio Plazo y Largo Plazo, y se hace una valoración especial si el impacto aparece en un momento crítico.

- **Persistencia (PE):** Tiempo supuesto de permanencia del efecto desde su aparición. Una vez transcurrido ese lapso el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previa a la acción por medios naturales, o mediante la introducción de medidas correctoras. Se diferencian en base a su permanencia dos tipos de impactos: temporal (ver figura 3.3) y permanente. En el tipo temporal, se supone una alteración no permanente o constante en el tiempo, y diferencia a su vez dos tipos de impactos según su duración: impacto fugaz (duración del efecto inferior a un año) e impacto temporal (duración entre uno y tres años). La variable Persistencia es valorada utilizando las etiquetas: Fugaz, Temporal y Permanente.

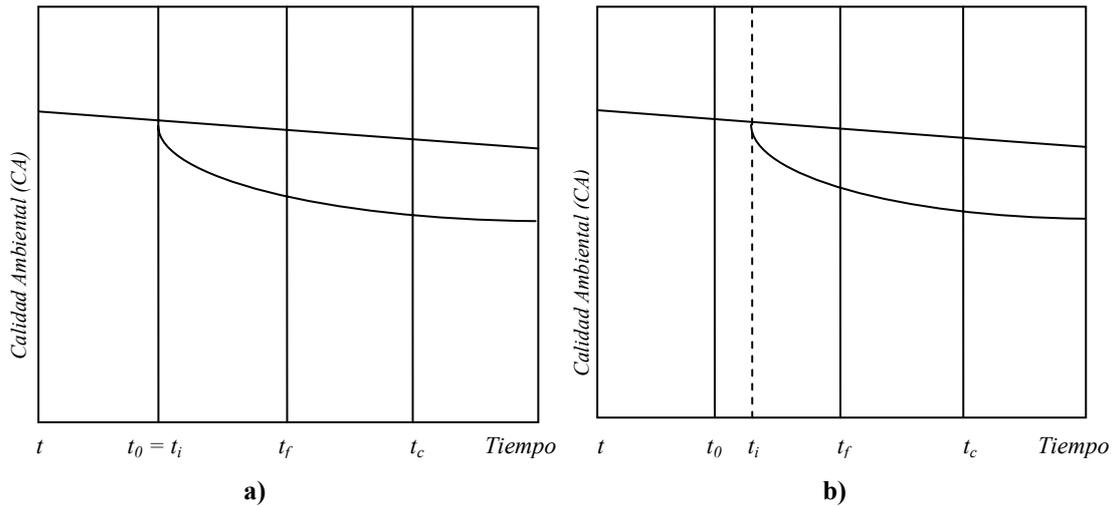


Fig. 3.2 Variable Momento, a) Impacto de aparición inmediata, b) ilustración genérica para impactos de aparición a medio plazo y a largo plazo.

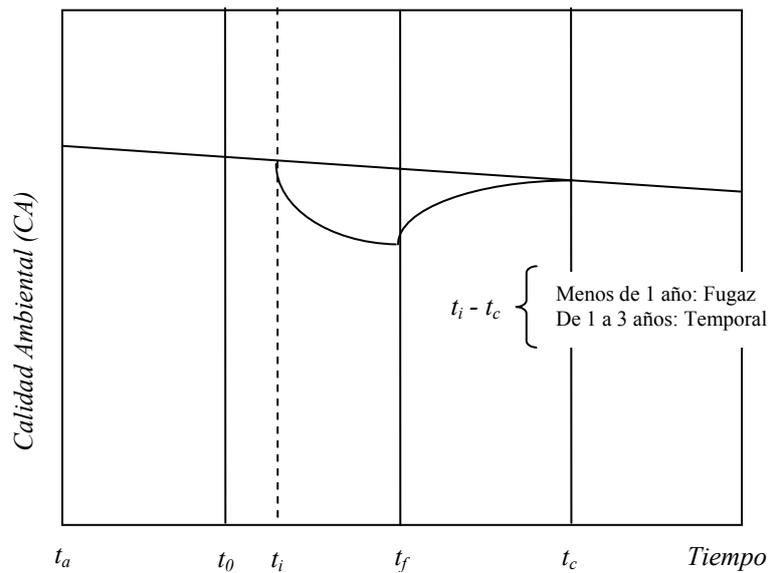


Fig. 3.3 Impacto temporal

- Periodicidad (PR): Tiene relación con la regularidad en la manifestación del efecto. Según su periodicidad se identifican cuatro tipos de impactos: continuo, discontinuo, periódico y aperiódico (ver figura 3.4).
 - Impacto continuo: su efecto se manifiesta a través de alteraciones con una permanencia constante en el tiempo.
 - Impacto discontinuo: Su efecto se manifiesta a través de alteraciones irregulares en su permanencia.

- Impacto periódico: su efecto se manifiesta de forma intermitente y continuada en el tiempo (cíclica o recurrente).
- Impacto aperiódico: son impactos de aparición irregular, su efecto se manifiesta en forma imprevisible en el tiempo y es preciso evaluar sus alteraciones en función de probabilidad de ocurrencia, especialmente cuando revisten gravedad excepcional.

La variable Periodicidad se valora utilizando las etiquetas: aperiódico, periódico, continuo y discontinuo.

Adicionalmente, en la variable acumulación, el tiempo aparece de forma implícita, puesto que está relacionada con si el impacto crece con el transcurso del tiempo. La acumulación del impacto es tenida en cuenta señalando si el impacto es acumulativo o no, por medio de las etiquetas: simple y acumulativo.

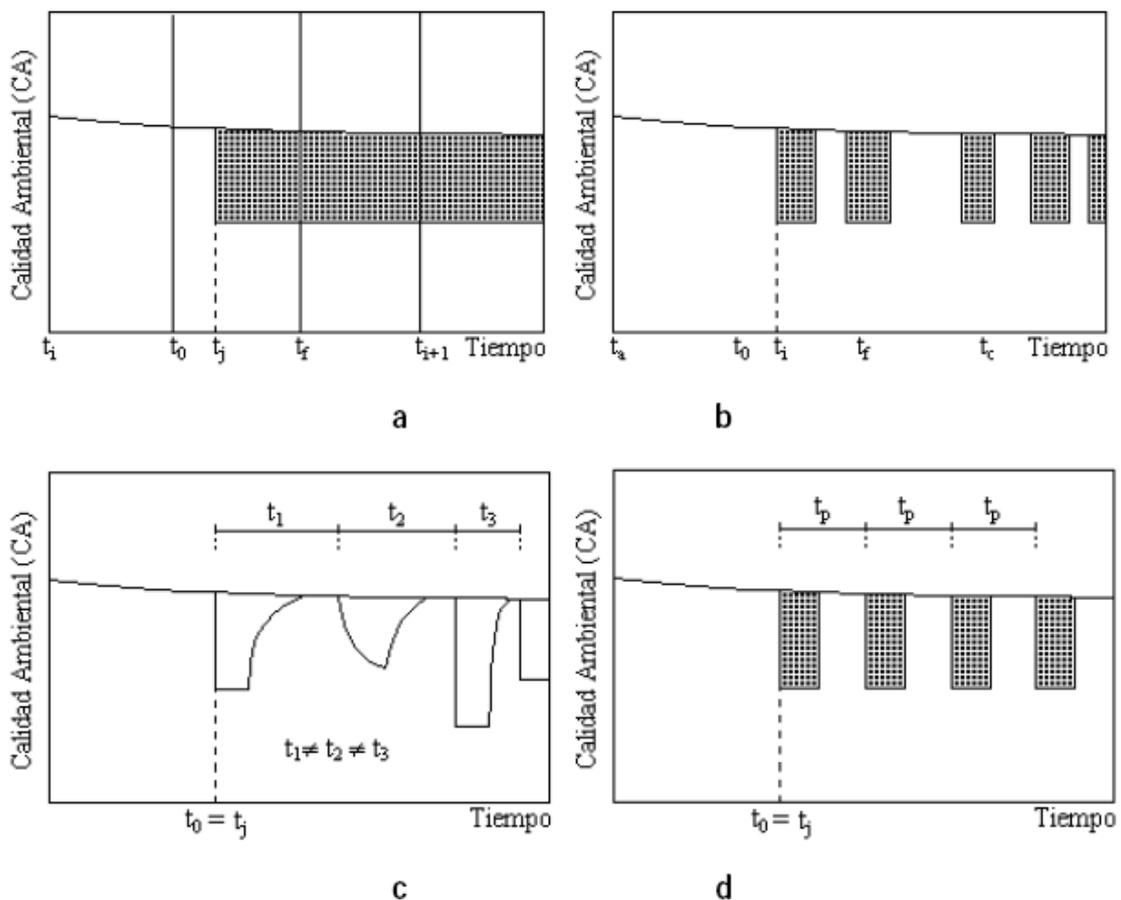


Fig. 3.4 Periodicidad del impacto. a) impacto continuo, b) impacto discontinuo, c) impacto aperiódico, d) impacto periódico.

Para el cálculo de la importancia del impacto ambiental, a las etiquetas seleccionadas se le asigna un número entero, que es utilizado en la ecuación:

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

En el capítulo 1, sección *Determinación de la Importancia de los efectos* del apartado 1.2.2 se muestra una descripción de cada una de las variables y su aporte en la ecuación anterior.

Nótese que a pesar de que se valora el momento de aparición del impacto, su duración y su periodicidad, no se hace un seguimiento en el tiempo de las variaciones de los impactos y se hace simplemente una predicción de cómo sería el impacto ambiental en el momento t_c , que usualmente es después de la finalización del proyecto.

3.2 PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN EN EL TIEMPO DEL IMPACTO AMBIENTAL (EIA(T))

Presentamos a continuación la propuesta de evaluación de la evolución en el tiempo del impacto ambiental, con la que se logra hacer un seguimiento del comportamiento del impacto que provoca sobre el entorno el proyecto evaluado.

Los aspectos fundamentales de esta propuesta son:

1. Establecimiento de periodos de valoración o evaluación del impacto ambiental (por ejemplo, cada año, cada seis meses, etc.), que denominaremos de ahora en adelante hitos del proyecto.
2. Predicción del impacto ambiental para los hitos del proyecto antes de la ejecución del proyecto. Siguiendo las metodologías tradicionales se predice el impacto que se estará produciendo en los primeros hitos del proyecto.
3. Evaluación del impacto ambiental en los hitos del proyecto durante la ejecución del proyecto. Se evalúa el estado del medio ambiente y teniendo en cuenta los resultados se realiza el ajuste de las predicciones para momentos posteriores.
4. Valoración de la efectividad de las medidas correctoras en cada hito (durante la ejecución del proyecto), lo que trae consigo el ajuste de las medidas correctoras del proyecto.

3.2.1 Hitos del proyecto

Los hitos del proyecto representan momentos relevantes en los que deberá realizarse una evaluación de impacto ambiental.

Para cada hito del proyecto se hará una predicción del impacto ambiental, así como un diagnóstico ambiental del medio ambiente llegado el momento, lo que permitirá conocer el estado real del entorno, valorar la efectividad de las medidas correctoras y de igual forma evaluar la inclusión de nuevas medidas correctoras.

Los hitos podrán estar definidos en intervalos de tiempo periódicos, cuya periodicidad es establecida por los expertos ambientales (ver figura 3.5), aunque esta no es una condición indispensable y puede variar en las diferentes fases de ejecución del proyecto.

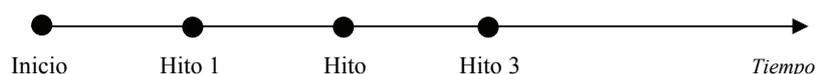


Fig. 3.5 Hitos del proyecto

Para la evaluación global del impacto ambiental en cada hito, vamos a considerar tres componentes fundamentales: el efecto predicho, el efecto calculado y el efecto de las medidas correctoras.

- El efecto predicho representa el valor del efecto del impacto ambiental obtenido en la predicción de efecto ambiental hecha en hitos anteriores (preferiblemente el valor ajustado obtenido en el hito anterior).
- El efecto calculado representa el valor de efecto que se calcula tras realizar el diagnóstico ambiental correspondiente al hito que se evalúa.
- El efecto de las medidas correctoras representa el efecto que se supone tendrán las medidas correctoras después de su aplicación.

Cada efecto se calculará de la misma forma que en los procedimientos clásicos, es decir, como el producto de la magnitud por la importancia. Por ejemplo, para el efecto predicho sería:

$$E_p = I_p M_p$$

Ahora, el cálculo de la Importancia y la Magnitud va a diferir un poco de los métodos clásicos.

La agregación de estos elementos se denomina Efecto Total (E_T) y representa la relación entre el impacto ambiental que se suponía existiría en ese momento y el impacto ambiental real unido a la aplicación de las medidas correctoras. El cálculo del Efecto Total para cada hito del proyecto se realiza mediante la agregación de los tres componentes definidos.

$$E_T = E_p + E_c + E_{mc} = I_p M_p + I_c M_c + I_{mc} M_{mc}$$

donde I representa la importancia del impacto, M representa la magnitud, y los subíndices p , c y mc representan predicho, calculado y medidas correctoras respectivamente.

A continuación se presentan los métodos que se utilizarán para calcular la importancia y la magnitud usadas para el cálculo del Efecto Total en cada hito del proyecto. Para la valoración del Efecto Ambiental se proponen las etiquetas: Nulo, Aceptable, Moderado, Severo, Crítico.

3.2.2 Magnitud del impacto

La magnitud del impacto representa una agregación de los valores de los descriptores ambientales utilizados para su medición. Para la obtención de los valores de magnitud se distinguen dos situaciones diferentes:

- Predicción y Medidas Correctoras: En los casos del efecto predicho y de las medidas correctoras, los expertos ambientales estiman la magnitud del impacto ambiental utilizando etiquetas lingüísticas. Esta valoración de la magnitud del impacto es similar a la realizada en las metodologías clásicas. En la tabla 3.1 se muestran las etiquetas con los posibles valores para la magnitud del impacto.

Tabla 3.1 Etiquetas para la valoración de la Magnitud

<i>Variable Lingüística Magnitud del Impacto</i>	<i>Etiquetas</i>
	Muy Baja
	Baja
	Media o Aceptable
	Alta
	Muy Alta

- **Cálculo:** En el caso del efecto calculado se hace un diagnóstico ambiental a través de mediciones o valoraciones de los descriptores ambientales de cada uno de los factores ambientales. Este proceso se describe detalladamente en este apartado.

El cálculo de la Magnitud se hace a partir de mediciones o valoraciones de diferentes descriptores ambientales seleccionados para cada uno de los factores ambientales. Los descriptores ambientales son parámetros cuantitativos o cualitativos considerados representativos del estado de los factores ambientales y puede mostrar cambios a lo largo del tiempo.

Se han considerado los descriptores ambientales puesto que son simplificaciones del sistema complejo que es el medio ambiente. Tienen una representación compacta, fácilmente comprensible; además sirven para la identificación de aquellos mecanismos que contribuyen al mejoramiento o degradación de las condiciones económicas, sociales y ambientales, permitiendo establecer metas precisas en la evaluación de los avances.

La magnitud será la escala común para la valoración de los descriptores ambientales. Se propone que la magnitud sea una variable difusa con las etiquetas: Muy baja, Baja, Media o Aceptable, Alta y Muy alta (ver tabla 3.1). De forma similar a la presentada en [78] se propone el uso de tablas de equivalencia para la asignación del valor de la magnitud. En el cuadro 3.1 se muestra un ejemplo de la representación de la magnitud para el descriptor ambiental Material Particulado.

Cuadro 3.1 Ejemplo de asignación de las etiquetas de la variable lingüística Magnitud para el descriptor ambiental Material Particulado

Factor Ambiental: Aire	
Descriptor ambiental: Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24h)	
Valor del descriptor (v)	Magnitud
Mayor que 355	Muy alta ²
155 – 354	Alta ¹
55 – 154	Media o aceptable
31 – 54	Baja
0 – 30	Muy baja

1. Estado poco saludable para las personas
2. Estado peligroso

Adaptado a partir de [63] y [67]

Para los descriptores cuantitativos se establecen puntos de control para realizar las mediciones. El valor utilizado para la transformación (v) en este caso es la media de las mediciones, es decir $v = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$ donde n es el número de mediciones hechas y m_i es la medición en el punto de control i .

A partir de los valores de magnitud de los descriptores ambientales se calcula la Magnitud Total del factor. Puesto que la Magnitud Total representa la agregación de las magnitudes de los descriptores del factor ambiental, se proponen dos formas para el cálculo de la Magnitud Total para cada factor f , M_{Tf} .

Magnitud Media. Si M_{if} la Magnitud del descriptor ambiental i del factor f y n es el número de descriptores ambientales del factor f .

$$M_{Tf} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{if}}{n}$$

Magnitud Ponderada (M_{Tf}^P), en este caso habría que asignar pesos según su importancia a los descriptores ambientales del factor ambiental. Si w_i representa el peso del descriptor ambiental i .

$$M_{Tf}^P = \frac{\sum_{i=1}^n w_i M_{if}}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

De manera similar se hace el cálculo de la Magnitud Total del Proyecto en el hito que se evalúa. Se proponen los índices Magnitud Media (M_T) y Magnitud Ponderada relativa al entorno (M_T^P).

Magnitud Media (M_T). Si m es el número de factores ambientales afectados por el proyecto.

$$M_T = \frac{\sum_{i=1}^m M_{Tf}}{m}$$

Magnitud Ponderada relativa al entorno (M_T^P). Si w_f representa la importancia relativa al entorno del factor ambiental f .

$$M_T = \frac{\sum_{f=1}^n w_f M_f}{\sum_{f=1}^n w_f}$$

Para el cálculo de cada uno de estos índices se propone la utilización de sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa, similar al presentado en el capítulo 1, sección 1.3.1.

3.2.3 Importancia del Impacto

La importancia del impacto es una medida cualitativa de los efectos de las acciones del proyecto sobre el Medio Ambiente condicionada principalmente por la intensidad y la extensión de los efectos. Además para la valoración de la importancia del impacto se utilizan otras variables no menos importantes (Cuadro 1.1).

En la metodología para la evaluación de la evolución en el tiempo del impacto ambiental que se presenta en este capítulo se propone valorar la importancia del impacto de manera diferente para los tres casos del efecto que se presentan.

La importancia del impacto se valora mediante la agregación de las variables utilizadas para caracterizarla. Se propone que se utilicen variables diferentes para cada uno de los casos: impacto predicho, impacto calculado e impacto de las medidas correctoras; puesto que representan etapas diferentes en el proceso de evaluación. Fueron eliminadas las variables que se utilizan para considerar el tiempo, porque esta evaluación se hace de manera periódica y se propone para hacer un seguimiento del comportamiento de los impactos en el tiempo.

Se propone, y las opiniones de los expertos lo ratifican, que las variables Naturaleza del impacto, Intensidad, Extensión, Sinergia y Efecto (ver Cuadro 1.1) se utilicen en los tres casos. La variable Reversibilidad se propone se utilice para el cálculo de la importancia del impacto predicho puesto que representa la posibilidad de recuperación del factor ambiental afectado y su valoración previa a la ejecución de la acción supone una elección más eficaz de las medidas correctoras.

La variable Acumulación se utilizaría para la valoración del impacto calculado, puesto

que se estimaría cuanto ha aumentado el impacto en el tiempo transcurrido [86]. Más adelante se muestran las etiquetas utilizadas para su valoración (Tabla 3.2).

La variable Recuperabilidad es utilizada en la valoración de la importancia del impacto de las medidas correctoras, pues se estimaría la posibilidad de reconstrucción del factor ambiental afectado con la aplicación de las medidas correctoras. Más adelante se muestran las etiquetas utilizadas para su valoración (Tabla 3.2).

Esta selección se hizo teniendo en cuenta, además, la opinión de los expertos ambientales del territorio. A partir de encuestas que se les realizaron se identificaron las variables utilizadas para la valoración del impacto ambiental que consideraban las más importantes, y cuales según ellos debían ser tenidas en cuenta para cada uno de los casos.

A continuación se muestran un resumen de las variables utilizadas para cada uno de los casos:

- Importancia del impacto predicho
 - Naturaleza del impacto
 - Intensidad
 - Extensión
 - Sinergia
 - Efecto
 - Reversibilidad
- Importancia del impacto calculado
 - Naturaleza del impacto
 - Intensidad
 - Extensión
 - Sinergia
 - Efecto
 - Acumulación
- Importancia del impacto de las medidas correctoras
 - Naturaleza del impacto (que por defecto se asume positiva)

- Intensidad
- Extensión
- Sinergia
- Efecto
- Recuperabilidad

En la tabla 3.2 se muestran las etiquetas utilizadas para la valoración de estas variables.

Tabla 3.2 Variables lingüísticas y sus etiquetas utilizadas para la valoración de la importancia del impacto ambiental

Variable	Etiquetas
Naturaleza del impacto	Positiva Negativa Indeterminada
Intensidad	Baja Media Alta Muy alta Total
Extensión	Puntual Parcial Extenso Total
Reversibilidad	Corto plazo Medio plazo Irreversible
Sinergia	Poco sinérgico Sinérgico Muy sinérgico
Efecto	Indirecto Directo
Acumulación	No acumulativo Baja Media Alta Muy alta
Recuperabilidad	Medida protección Mitigable a corto plazo Mitigable a medio plazo Mitigable a largo plazo Irrecuperable (Medida de compensación)

Las etiquetas utilizadas para la valoración de las variables son esencialmente las mismas que las utilizadas en [18], excepto en los casos de las variables: Acumulación y Recuperabilidad que fueron cambiadas con el objetivo de lograr una mejor representación de los distintos casos.

El conjunto de etiquetas para valorar la Acumulación fue ampliado, pues anteriormente solo se tenía en cuenta si el impacto era acumulativo o no. Ahora se incluye además para el caso de los impactos acumulativos cómo es la acumulación del impacto en el momento que se evalúa: Baja, Media, Alta, Muy Alta.

Para la variable Recuperabilidad se tuvo en cuenta para la definición de las etiquetas el tipo de medida correctora que se aplica: de Protección, de Mitigación o de Compensación. Las etiquetas definidas son: Medida de protección, Mitigación a corto plazo, Mitigación a medio plazo, Mitigación a largo plazo e Irrecuperable (Medida de compensación). La etiqueta Irrecuperable se utiliza para el caso de los impactos irrecuperables, que aunque no se pueda restablecer el entorno afectado pueden iniciarse acciones beneficiosas compensatorias, tanto social como ambientalmente.

Para el cálculo de la importancia se propone la utilización de un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa (ver sección 1.3.1), cuya función de razonamiento aproximado sería de la forma:

$$IMP = \sum_{i=1}^n w_i g_i(x_i)$$

donde w_i representa el peso de la variable i , y $g_i(x_i)$ es un función que subvalora o sobrevalora los valores bajos de x_i . Se deja la asignación de los pesos de las variables a los expertos, ya que en cada proyecto o actividad va a ser diferente, y debe cumplirse que la suma de los pesos sea igual a uno.

La variable Naturaleza del impacto, que no se tiene en cuenta para el cálculo de *IMP*, será utilizada para el preprocesamiento de la importancia del impacto para los cálculos globales.

3.3 IMPORTANCIA ACUMULADA DEL IMPACTO

En la evaluación por hitos se obtiene una visión más detallada del impacto, pero se pierde la visión global del impacto del proyecto en el total de su vida útil que provee una ecuación como:

$$I_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}$$

Para obtener una visión global de la importancia del impacto ambiental que provoca el proyecto se propone la noción de importancia acumulada del impacto.

Se presenta como una alternativa para el cálculo de la importancia del impacto en proyectos largos. Se propone realizar la estimación de la variación del impacto del proyecto en un periodo de tiempo definido por los expertos ambientales. Esta estimación sería una función que relaciona el impacto del proyecto con el tiempo.

Esta alternativa se utilizaría esencialmente en la etapa de predicción, ya sea para predecir la importancia del impacto en un hito determinado o el mejoramiento del entorno tras la aplicación de las medidas correctoras. Igualmente, la importancia acumulada del impacto, sirve para el cálculo de la importancia global del proyecto.

Es importante señalar, que después de obtener el Efecto Total en un hito, la función de estimación del impacto puede redefinirse o ajustarse teniendo en cuenta el efecto de las medidas correctoras y el impacto real del proyecto sobre el medio ambiente.

Para realizar el cálculo de la importancia acumulada, los expertos ambientales, de ser posible, definirán la función de variación del impacto ambiental a lo largo del tiempo y la variación de la ambigüedad de la predicción. La función $via(t)$ indica la variación del impacto ambiental a lo largo del tiempo. La función $\delta(t)$ indica la variación de la ambigüedad de la predicción. Estas curvas son diseñadas por los expertos ambientales de acuerdo a su experiencia. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo.

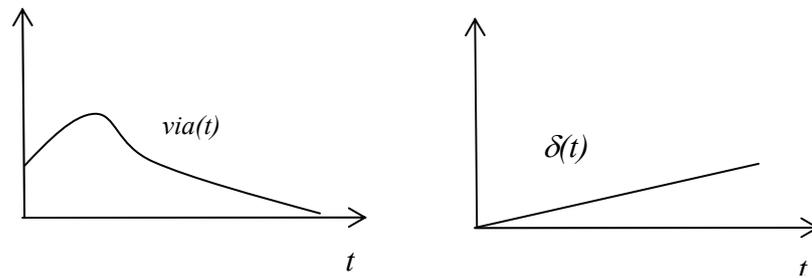


Fig. 3.6 Funciones para la valoración en el tiempo del impacto ambiental, $via(t)$ y $\delta(t)$.

Con la conjunción de las curvas $via(t)$ y $\delta(t)$ puede construirse un número difuso variable en el tiempo: $IA(t)$ es un número difuso triangular simétrico centrado en $via(t)$ con soporte $\delta(t)$. $IA(t)$ representa una valoración difusa del cambio de la importancia del impacto en el tiempo (figura 3.7).

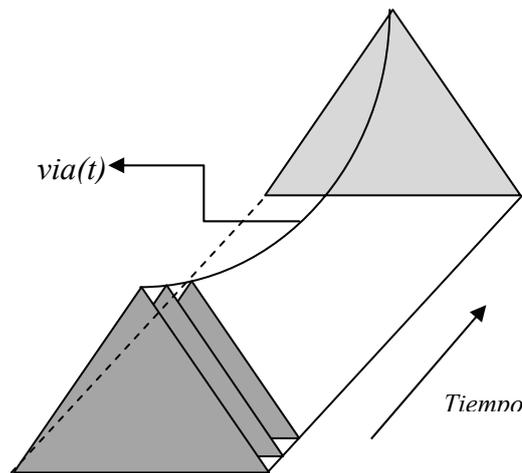


Fig. 3.7 Función difusa de variación del impacto ambiental en el tiempo, $IA(t)$.

La importancia acumulada del proyecto (IMP_a) es un número crisp que resulta de:

$$IMP_a = \frac{A_C}{A_T}$$

donde A_C es el área bajo la curva $IA(t)$ y A_T es el área bajo la curva $IA(t)$ si $via(t)$ hubiera sido el valor crisp máximo posible durante todo el tiempo del proyecto sin ambigüedad (Ver figura 3.8).

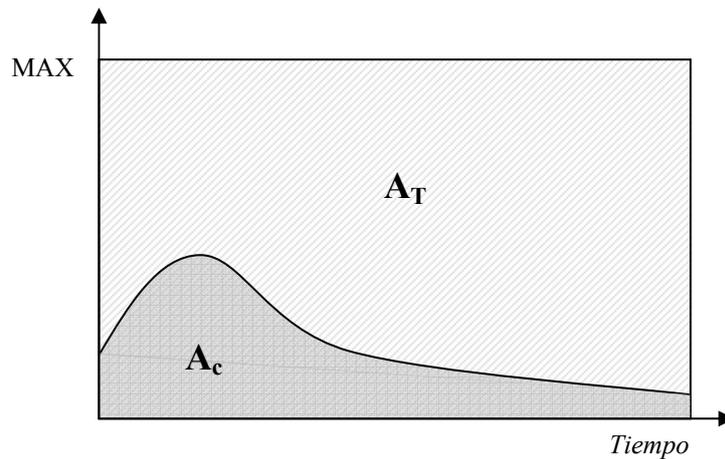


Fig. 3.8 Representación de las áreas para el cálculo de la importancia acumulada

Para el cálculo de $IMPa$ pueden observarse dos casos:

- La $IA(t)$ se ha valorado con ambigüedad nula. El área difusa de la intensidad del impacto corresponde al área de la región sombreada (Ver figura 3.9).

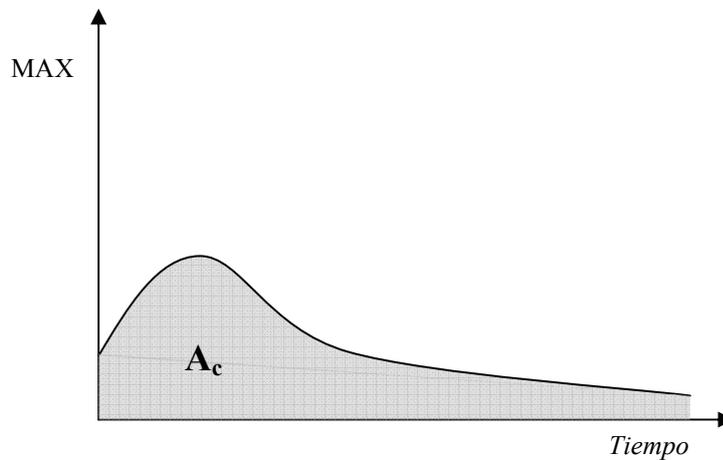


Fig. 3.9 Intensidad del impacto del proyecto

- La valoración de $IA(t)$ tiene alguna ambigüedad, ya que la región tiene límites difusos. Se propone para el cálculo del área la fórmula $A_C = \int_S \mu_{IA}(t, y) dt$ donde t representa el tiempo, $y = via(t)$, y $\mu_{IA}(t, y)$ es la función de pertenencia de $IA(t)$ (Ver figura 3.7).

El método para calcular la importancia acumulada es una forma para predecir el impacto total del proyecto sobre el entorno. Siguiendo la propuesta presentada en este

capítulo es necesario distinguir entre la importancia predicha, importancia calculada e importancia de las medidas correctoras, que pueden ser utilizadas para el cálculo del Efecto Total.

La importancia acumulada predicha para cada hito es:

$$IMPa_i = \frac{A_c}{A_T}$$

Donde A_c área bajo la curva hasta que $t = Hito_i$ y A_T es el área total si el impacto hubiera tenido valor máximo hasta el hito $Hito_i$. (Ver figura 3.10)

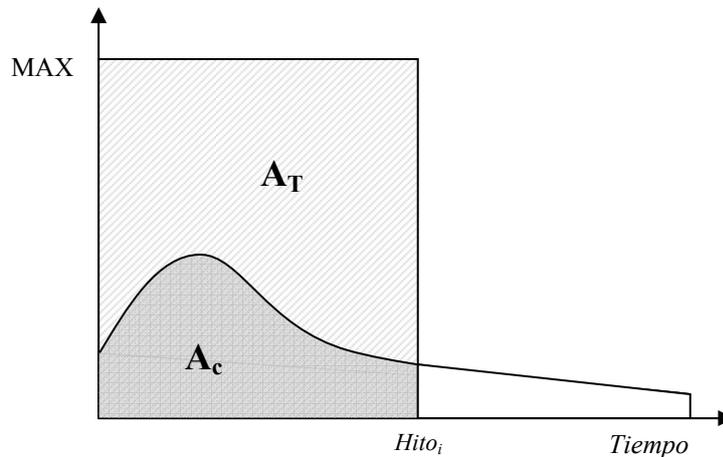


Fig. 3.10 Representación gráfica del cálculo de $IMPa_i$

Para el caso de la *importancia calculada* se propone que se haga una valoración de las variables presentadas en la tablas 3.2 con el objetivo de que se pueda hacer un ajuste de las predicciones para hitos posteriores.

En el caso de la *importancia acumulada de las medidas correctoras* se propone se haga una valoración utilizando las funciones $via(t)$ y $\delta(t)$ para predecir cómo debe mejorar el entorno con la aplicación de las medidas correctoras. Debe recordarse que el impacto de las medidas correctoras es positivo para el medio ambiente. A partir de esas funciones se hacen los cálculos de manera similar al caso de la importancia acumulada predicha.

3.3.1 Método simplificado para el cálculo de la importancia acumulada

Teniendo en cuenta que los expertos no tienen siempre conocimientos acerca de técnicas difusas, se propone un método tabular para definir la función $via(t)$. Para ello se han definido las etiquetas lingüísticas siguientes: Nulo, Aceptable, Moderado, Severo y Crítico.

Las columnas de la tabla representan el tiempo y las filas la valoración de la variación del impacto. Cada celda de la tabla T_{ij} representa cómo estima el experto que sería el valor de la función $via(t)$ en el momento i .

En la tabla 3.3 se muestra un ejemplo de la tabla de estimación de $via(t)$. En este caso la periodicidad de la valoración es cada año, y para cada año se hace una predicción en cada trimestre. En la figura 3.11 se muestra la representación gráfica de $via(t)$ para los valores de la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Estimación de la función de variación del impacto del proyecto

Valoración	Año 1			Año 2			Año 3			Año 4			
Crítico													
Severo			X	X	X	X							
Moderado		X	X				X	X	X				
Aceptable	X								X	X	X		
Nulo											X	X	X

Este método permite igualmente a los expertos ambientales definir la periodicidad de la estimación (cada tres meses, semestralmente, etc.).

El cálculo del valor de A_C sería entonces de la siguiente manera:

$$A_C = \sum_{i=1}^n A_{Hito}$$

Donde n representa el número de hitos utilizados para la representación de $via(t)$ y A_{Hito} representa el área del rectángulo correspondiente al α -corte 0.5 de la etiqueta seleccionada. El cálculo se simplifica aún más si se supone que los hitos del proyecto tienen igual duración.

Los valores de A_T e IMP_a se calculan de manera similar a la mostrada en el apartado anterior.

Análogamente a lo presentado en el apartado anterior se distinguen las formas de cálculo de la importancia acumulada del impacto, predicha, calculada y de las medidas

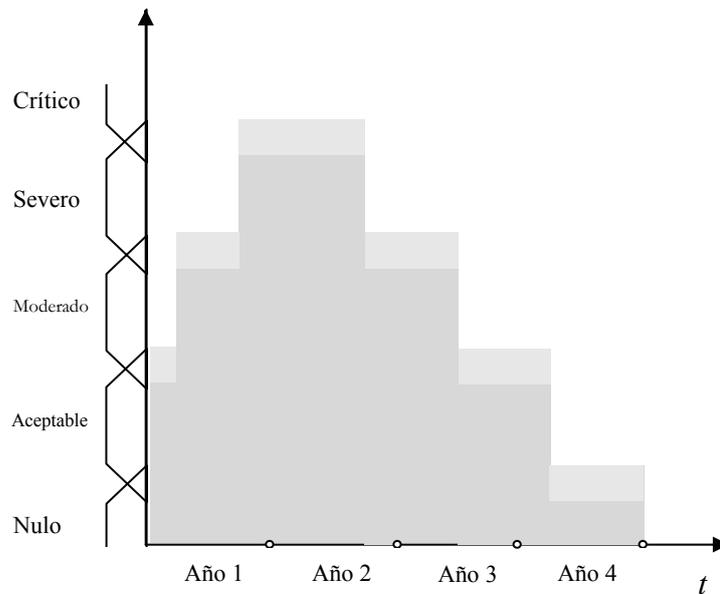


Fig. 3.11 Representación gráfica de la función $via(t)$ cuya forma tabular se muestra en la tabla 3.3

correctoras. Para la importancia acumulada calculada se recomienda la utilización del proceso anterior, es decir, la valoración de la importancia por medio de la estimación de las variables.

Importancia acumulada predicha: Se realiza el cálculo del cociente de áreas, se considera el tiempo sólo hasta el hito del proyecto que se evalúa. En función de la ejecución del proyecto y los valores obtenidos en cada evaluación, la estimación tabular de $via(t)$ puede cambiar.

Importancia acumulada de las medidas correctoras: Se propone que se haga una estimación tabular del mejoramiento del entorno con la aplicación de las medidas correctoras en cada hito. La tabla sería similar a la presentada en la tabla 3.3. Debe recordarse que la importancia del impacto de las medidas correctoras es positiva.

3.3.2 Ejemplo del cálculo de la importancia utilizando el método simplificado

El significado de IMP_a , la importancia acumulada del impacto del proyecto, es similar al significado de IMP que se calcula por la forma tradicional. Para obtener la etiqueta lingüística de la variable importancia del impacto, se utiliza un método de aproximación lingüística.

Para conocer la etiqueta para la valoración de *IMPa* se calcula el grado de pertenencia de *IMPa* a los conjuntos difusos utilizados para la representación de cada una de las etiquetas de la importancia del impacto. El valor lingüístico de la importancia del impacto será aquel al que *IMPa* pertenezca en mayor grado.

En el presente apartado se hace una comparación experimental de los métodos propuestos para el cálculo de la importancia. Para ellos se hizo un estudio con dos valores de impacto hipotéticos ya calculados con las metodologías tradicionales ([46], [76]) y se recalculan sus valores utilizando el método simplificado a través del cociente de áreas difusas. En los ejemplos mostrados sólo se hace el cálculo de la *importancia acumulada predicha*, pues se tiene en cuenta que los métodos que se utilizan como referencia para la comparación sólo hacen una predicción del impacto total del proyecto en todo su tiempo de vida. Por ello, para el desarrollo de los ejemplos que se presentarán a continuación, se estima la variación del impacto ambiental durante cuatro años, se calcula la importancia acumulada del impacto y este valor es comparado con el obtenido con la metodología tradicional.

Para hacer estas pruebas se supone un periodo de cuatro años con hitos anuales y subdivisiones en trimestres.

- *Impacto 1: Cambios en la composición físico-química de las aguas de escurrimiento superficiales.*

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 son depositados en los ríos y arroyos. Este impacto es de carácter negativo, su efecto se incrementa con el tiempo y es mitigado en la fase de abandono de la minería.

- Intensidad: Muy alta
- Extensión: Parcial
- Momento: Inmediato
- Persistencia: Temporal
- Reversibilidad: Irreversible
- Periodicidad: Continuo
- Sinergia: Muy sinérgico

- Acumulación: Acumulativo
- Efecto: Directo
- Recuperabilidad: Mitigable
- **Importancia: Muy posiblemente Severo** (con grado de posibilidad 1.0), **Muy posiblemente Moderado** (con grado de posibilidad 0.89). Calculado en [76]

Los expertos indican que el comportamiento de la función $via(t)$ puede ser como:

Valoración	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4			
Crítico																
Severo						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Moderado			X	X	X											
Aceptable	X	X														
Nulo																

- *Impacto 2: Aumento de los niveles de polvo*

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

- Intensidad: Alta
- Extensión: Parcial
- Momento: Inmediato
- Persistencia: Temporal
- Reversibilidad: Medio plazo
- Periodicidad: Periódico
- Sinergia: Muy sinérgico
- Acumulación: Acumulativo
- Efecto: Directo
- Recuperabilidad: Recuperable a medio plazo

- **Importancia: Muy posiblemente Severo** (con grado de posibilidad 0.73), **Muy posiblemente Moderado** (con grado de posibilidad 1.0). Calculado en [76].

Los expertos indican que el comportamiento de la función $via(t)$ puede ser como:

Valoración	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4			
Crítico																
Severo																
Moderado		X	X			X	X			X	X			X	X	
Aceptable	X			X	X			X	X			X	X			X
Nulo																

La representación gráfica de las funciones de variación del impacto ambiental del Impacto 1 y del Impacto 2, se muestran en la figuras 3.12 y 3.13.

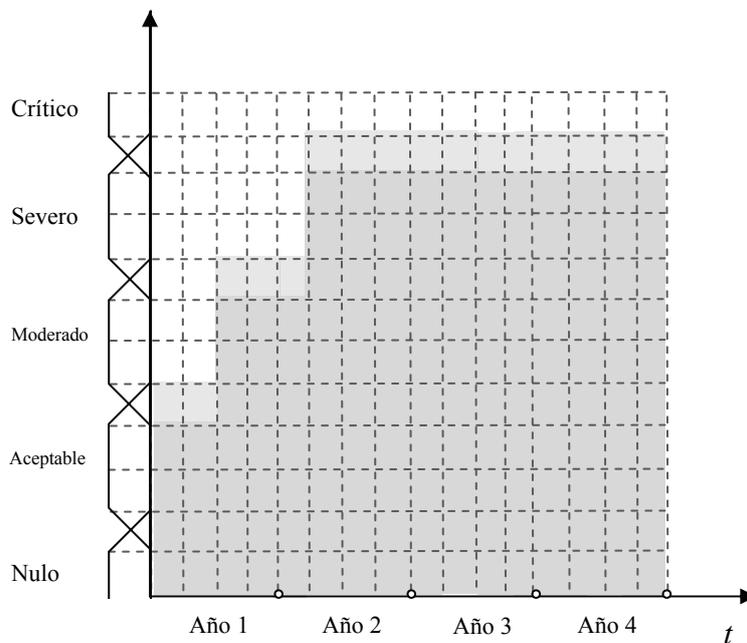


Fig. 3.12 Función de variación del impacto ambiental en el tiempo, $via(t)$, para el Impacto 1

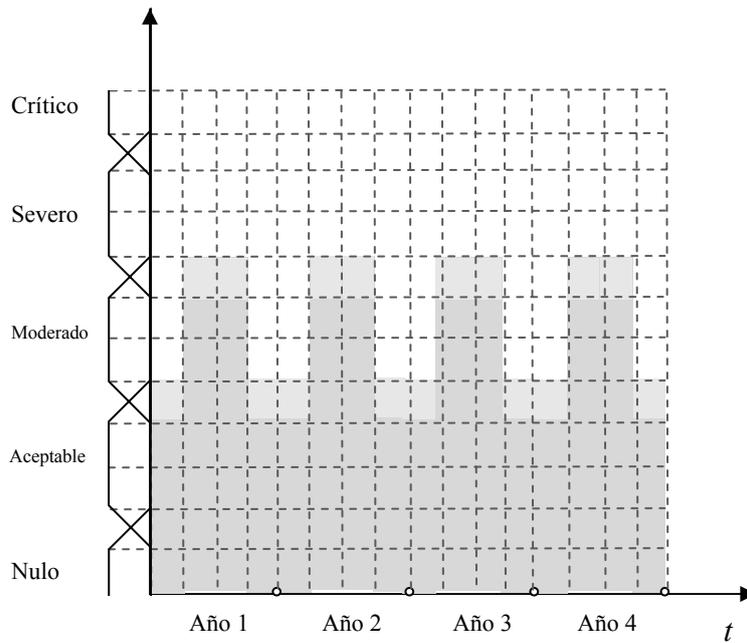


Fig. 3.13 Función de variación del impacto ambiental en el tiempo, $via(t)$, para el Impacto 2

Para el cálculo de las áreas de las regiones se supone que la longitud de cada trimestre es 1 unidad ($1 u$) y que la longitud de los números (segmento de los valores con grado de pertenencia 1) es 2 unidades ($2 u$). Por lo que se tendrá que la longitud de Nulo y Crítico es $1 u$ y la longitud de Moderado, Aceptable y Severo es $2 u$. Las regiones de intersección entre los números tiene de longitud $1 u$.

- Cálculo de la importancia del Impacto 1

Con las suposiciones asumidas se tiene que:

$$A_{Año1} = 22$$

$$A_{Año2} = 37$$

$$A_{Año3} = 40$$

$$A_{Año4} = 40$$

$$A_T = 192$$

Siguiendo la ecuación propuesta en el apartado 3.3.1, $A_C = 147$.

De ahí se tiene que $IMPa = 0.72$, que representa la importancia acumulada del impacto.

Haciendo la aproximación lingüística del valor -0.72 (por tratarse de un impacto negativo) en la variable Importancia del impacto (ver Tabla 2.1) se tiene que el impacto es Crítico (0.18) y Severo (0.81). Por lo que el impacto 1 es valorado como Severo.

- Cálculo de la importancia del impacto 2

Con las mismas consideraciones se tiene que:

$$A_{Año1} = A_{Año2} = A_{Año3} = A_{Año4} = 22$$

$$A_C = 88$$

$$A_T = 192$$

De ahí se tiene que $IMP_a = 0.45$, que representa la importancia del impacto.

Haciendo la aproximación lingüística del valor -0.45 (por tratarse de un impacto negativo) en la variable Importancia del impacto (ver tabla 2.1) se tiene que el impacto es Severo (0.48) y Moderado (0.57). Por lo que el impacto 2 es valorado como Moderado.

En la tabla 3.4 se muestra un resumen del proceso para la obtención de la importancia acumulada para los impactos 1 y 2.

Tabla 3.4 Resumen del Proceso de obtención de la Importancia Acumulada del Impacto

	Impacto 1	Impacto 2
<i>Área total (A_T)</i>	192	
<i>Área bajo IA(t)</i>	139	88
<i>IMP_a</i>	0.72	0.45
<i>Resultados</i>	Crítico (0.18) Severo (0.88)	Severo (0.48) Moderado (0.57)
<i>Importancia Acumulada</i>	Severo	Moderado

La tabla 3.5 resume los resultados obtenidos en los experimentos y los valores obtenidos de la manera tradicional, utilizando la metodología de Conesa y la metodología difusa presentada en el capítulo 2. De ella se puede concluir, por la aproximación de los

resultados obtenidos, que ambos métodos son similares y pueden ser utilizados indistintamente para la valoración de la importancia de los impactos ambientales.

Tabla 3.5 Resumen de Resultados

Impactos	Importancia Total (Met. de Conesa)	Importancia Global (Met. difusa)	Importancia Acumulada
Impacto 1	Severo	<i>Muy posiblemente (1.0) Moderado</i> Muy posiblemente (0.89) Severo	Severo (0.88) Crítico (0.18)
Impacto 2	Moderado	<i>Muy posiblemente (1.0) Moderado</i> Muy posiblemente (0.73) Severo	Moderado (0.57) Severo (0.48)

3.4 METODOLOGÍA PARA EL SEGUIMIENTO EN EL TIEMPO DEL IMPACTO AMBIENTAL

En este apartado se hace una formalización de las estrategias propuestas anteriormente. Para ello se propone la metodología que a continuación se presenta.

Esta metodología consta de dos etapas fundamentales:

I. Evaluación inicial de impacto ambiental

- a. **Identificación de acciones del proyecto, factores ambientales y sus descriptores (indicadores) ambientales, impactos e hitos del proyecto.** Este paso de la metodología es similar a los pasos de identificación de las metodologías anteriores. Aparece la definición de los hitos del proyecto.
- b. **Predicción de la importancia y la magnitud del impacto ambiental utilizando técnicas difusas.** Se proponen dos métodos para esta evaluación preliminar, el método difuso presentado en el capítulo 2 y el método difuso para el seguimiento en el tiempo del impacto. Teniendo en cuenta que esta es una metodología generalizadora y que los expertos ambientales pueden utilizar un método u otro según las características del proyecto, se proponen los siguientes nombres para diferenciar las metodologías presentadas en esta memoria:
 - i. **Método difuso simple:** a través de la metodología de evaluación de impacto ambiental difusa propuesta en el capítulo 2.

- ii. *Método difuso por hitos*: a través de la valoración de la importancia y la magnitud del impacto (en este caso importancia y magnitud predichas) en los hitos del proyecto identificados, utilizando el método propuesto en el apartado 3.2.
- c. *Análisis global del impacto ambiental del proyecto.***
- d. *Selección de las medidas correctoras del proyecto.***
- i. *Predicción de la importancia de las medidas correctoras*. En este paso de la metodología son seleccionados los factores ambientales que mayor daño reciben y se hace un estudio de los valores que debe tener la importancia del impacto para que los efectos sobre el factor ambiental disminuyan. Para ello se utiliza el método propuesto en 2.3.
 - ii. *Selección de las medidas correctoras a utilizar*. Luego de tener una estimación de los valores de importancia son seleccionadas las medidas correctoras que se aplicarán en cada caso. Estas medidas seleccionadas son divididas según su tipo: de protección, de mitigación o compensatoria. Las medidas de protección y las de mitigación se implementan para mejorar la calidad del factor ambiental. Las medidas compensatorias aunque no representen un mejora directa de la calidad ambiental en el lugar del emplazamiento del proyecto, si constituyen mejoras en la condiciones de vida y de la calidad ambiental en zonas cercanas al proyecto. Finalmente, en caso de utilizarse el método difuso por hitos, se realiza la valoración de la importancia y la magnitud de las medidas correctoras, y se calcula su efecto ambiental (según lo planteado en el apartado 3.2).

II. Evaluación de la evolución en el tiempo del impacto ambiental

- a. *Diagnóstico ambiental para el hito del proyecto actual.*** En este paso se evalúa la magnitud del impacto ambiental a través de la valoración y medición de los descriptores ambientales. Siguiendo el método propuesto en la sección 3.2.2 se hace la valoración de la magnitud total del proyecto. Igualmente, se realiza la valoración de la importancia del impacto que está teniendo lugar en ese momento. Finalmente se calcula el Efecto Total, para conocer el estado del medio ambiente para el hito que se evalúa.

- b.** *Ajuste de las predicciones para hitos posteriores.* Teniendo en cuenta el valor del Efecto Total calculado en el paso anterior, se realiza el análisis de los resultados obtenidos.
- c.** *Valoración de la efectividad de las medidas correctoras* y ajuste de la selección de las medidas correctoras a aplicar en el proyecto.

Capítulo 4

SIAM: Sistema Informático de Apoyo a la Evaluación de Impacto Ambiental para Proyectos Mineros

La Evaluación de Impacto Ambiental es un proceso complejo al cual se asocia un gran volumen de datos. Con el objetivo de facilitar la utilización de la metodología propuesta en esta memoria por los expertos ambientales, se decide desarrollar un software para la evaluación de impacto ambiental.

En una primera etapa se decidió incluir las características del seguimiento en el tiempo del impacto al software TDEIA, utilizado para probar la efectividad de la inclusión de técnicas difusas en la evaluación de impacto ambiental de proyectos mineros. Sin embargo, tras un análisis profundo se comprobó la dificultad para implementar el método simplificado de cálculo de la importancia acumulada; es por ello que se decide el desarrollo de un nuevo sistema para implementar la nueva metodología de evaluación por hitos propuesta, manteniendo las características de utilización fácil e intuitiva y orientado a la ayuda en la toma de decisiones.

La principal característica de este sistema es la integración de varias técnicas de inteligencia artificial: razonamiento aproximado basado en aritmética difusa y reglas de inferencia para modelar el conocimiento experto. ([56], [57], [74], [77])

Se presenta el sistema SIAM (Sistema para la evaluación de Impacto AMbiental) en una versión para la evaluación de impacto ambiental de proyectos de minería, toda vez que es esta la actividad económica fundamental de Moa. Sin embargo, por las características de su diseño, puede ser fácilmente extendido a otros dominios.

En el presente capítulo se describen primeramente los elementos que sustentaron la decisión de desarrollar un sistema informático de apoyo al proceso de evaluación de impacto ambiental, seguidamente se muestra el diseño conceptual del sistema, se describen los módulos que lo conforman y las herramientas utilizadas para su implementación. En la sección 4.3 se describen brevemente la interfaz gráfica de usuario y las potencialidades del sistema; finalmente se muestra la aplicación de la metodología a un caso de estudio para lo cual se utiliza la herramienta informática desarrollada.

4.1 BASES DEL APOYO PARA LA EIA

El software que se presenta permite realizar la evaluación de impacto ambiental utilizando la metodología para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental descrita en el capítulo anterior.

Las tareas que implementa el sistema son las siguientes:

1. Identificación del proyecto
 - a. Identificación de las acciones del proyecto
 - b. Identificación de los factores ambientales potencialmente afectados
 - c. Identificación de los posibles impactos ambientales provocados por el proyecto
 - d. Identificación de los hitos del proyecto
2. Predicción del impacto del proyecto
 - a. Valoración cualitativa de las variables asociadas a la importancia del impacto
 - b. Predicción de la importancia del impacto que provocará el proyecto
 - c. Estimación y/o medición de la magnitud del impacto ambiental
 - d. Predicción de los índices globales: Calidad Ambiental, Efecto Ambiental y Valor Ambiental
 - e. Ajustes de las predicciones para hitos posteriores del proyecto
3. Corrección de los impactos ambientales

- a. Selección de los elementos (acciones, factores, hitos, etc.) que requieren la aplicación de medidas correctoras
- b. Estimación de la importancia del impacto corregido a partir de:
 - i. Modificación de los impactos, de manera tal que resulten menos agresivos al medio ambiente
 - ii. Inclusión de nuevas acciones al proyecto
- c. Selección de las medidas correctoras que se aplicarán
- d. Valoración de la efectividad de las medidas correctoras

A partir de las tareas que se proponen el sistema está constituido por tres módulos fundamentales:

- Identificación, el cual permite la identificación de las acciones del proyecto, factores ambientales e impactos ambientales. Además se definen los hitos para las evaluaciones en el tiempo del impacto ambiental.
- Valoración y predicción, permite la valoración de los efectos del proyecto en el entorno, así como predecir la importancia y la magnitud de los impactos, y finalmente se realizan los cálculos globales, que permiten obtener indicadores tales como: importancia total del impacto del proyecto, cómo se afecta la calidad ambiental con el desarrollo del proyecto, entre otros.
- Corrección, permite estimar el valor cualitativo de la importancia del efecto que deben tener las medidas correctoras para mantener los valores del impacto del proyecto en el umbral de aceptación. Igualmente, se sugieren posibles medidas a aplicar.

En la figura siguiente se muestra las etapas principales del sistema de evaluación de impacto ambiental.

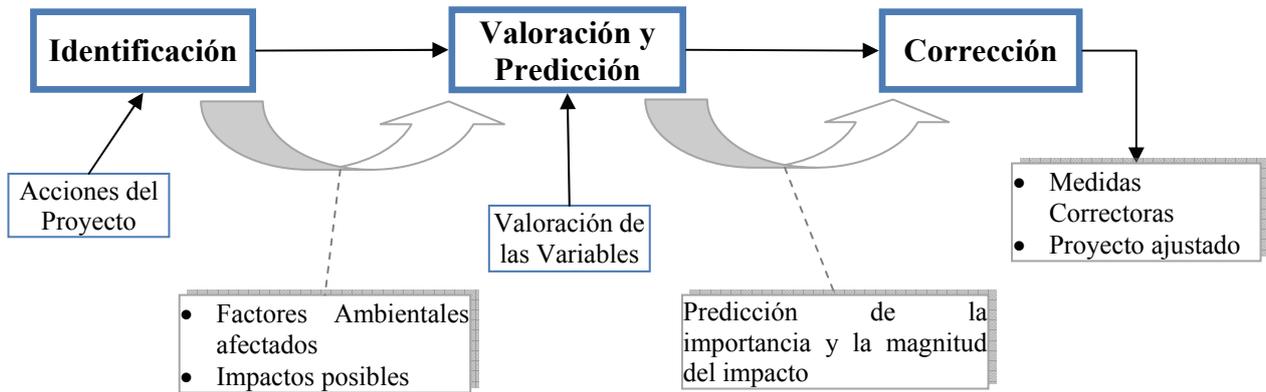


Fig. 4.1 Tareas del sistema

El proceso de razonamiento realizado por el sistema comprende fundamentalmente los siguientes pasos:

- Identificación de los factores ambientales y los impactos posibles a partir de las acciones del proyecto.
- Predicción de la importancia del impacto.
- Predicción de los índices globales.
- Definición de la necesidad de aplicación de medidas correctoras.
- Caracterización y selección de las medidas correctoras.

4.2 DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema desarrollado tiene un diseño modular, lo que mejora su comprensibilidad, eleva su fiabilidad y facilita modificaciones futuras.

El sistema está compuesto por 6 módulos (figura 4.2): Base de Conocimiento, Identificación, Valoración y Predicción, Corrección, Modelo del Proyecto e Interfaz de Usuario.

La *Base de Conocimiento*, es una descripción del dominio de las evaluaciones de impacto ambiental para proyectos mineros, adaptada a las características de Moa, teniendo en

cuenta que el conocimiento en ella representado se obtuvo y validó a través de encuestas y entrevistas realizadas a expertos ambientales de Moa.

Los módulos *Identificación*, *Valoración y Predicción*, y *Corrección* implementan las tareas homónimas del sistema y representan su capa de razonamiento. Estos módulos son los encargados de realizar las acciones inteligentes del sistema y cada uno tiene su propio módulo de inferencia. Más adelante, en esta misma sección, son descritos en más detalles.

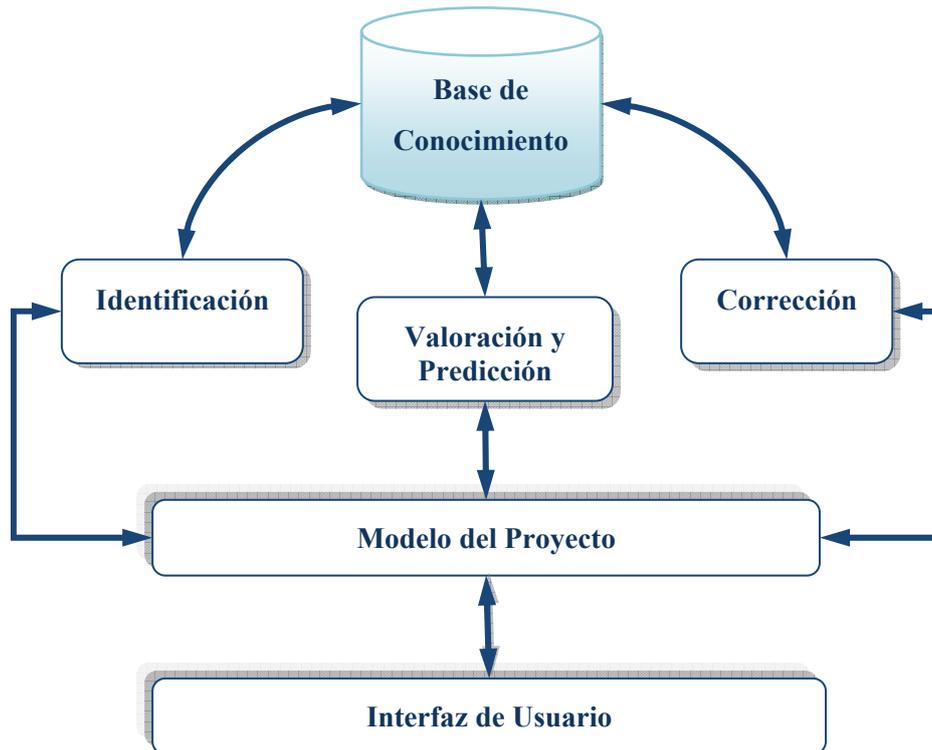


Fig. 4.2 Arquitectura del sistema

El módulo *Modelo del Proyecto* sirve de intermediario para el intercambio de información entre la capa de razonamiento y la *Interfaz de Usuario*; contiene los datos del proyecto que se evalúa (*datos del proyecto*) y es la memoria de trabajo del sistema.

La *Interfaz de Usuario* permite la interacción entre el usuario y el sistema, fue diseñada siguiendo los criterios de usabilidad obtenidos de los intercambios con los expertos ambientales, futuros usuarios del sistema.

4.2.1 Módulo: Base de Conocimiento

La base de conocimiento de este sistema informático representa un modelo genérico de proyecto minero (acciones del proyecto, factores potencialmente afectados y los posibles impactos que provoca la actividad), los indicadores ambientales que se utilizan para la medición de la calidad de los factores ambientales y las medidas correctoras utilizadas para la minimización de los impactos que se producen, adaptado a las características de Moa, toda vez que el conocimiento en ella representado fue obtenido y validado con expertos ambientales de este territorio.

La figura 4.3 muestra la estructura general de la base de conocimientos.

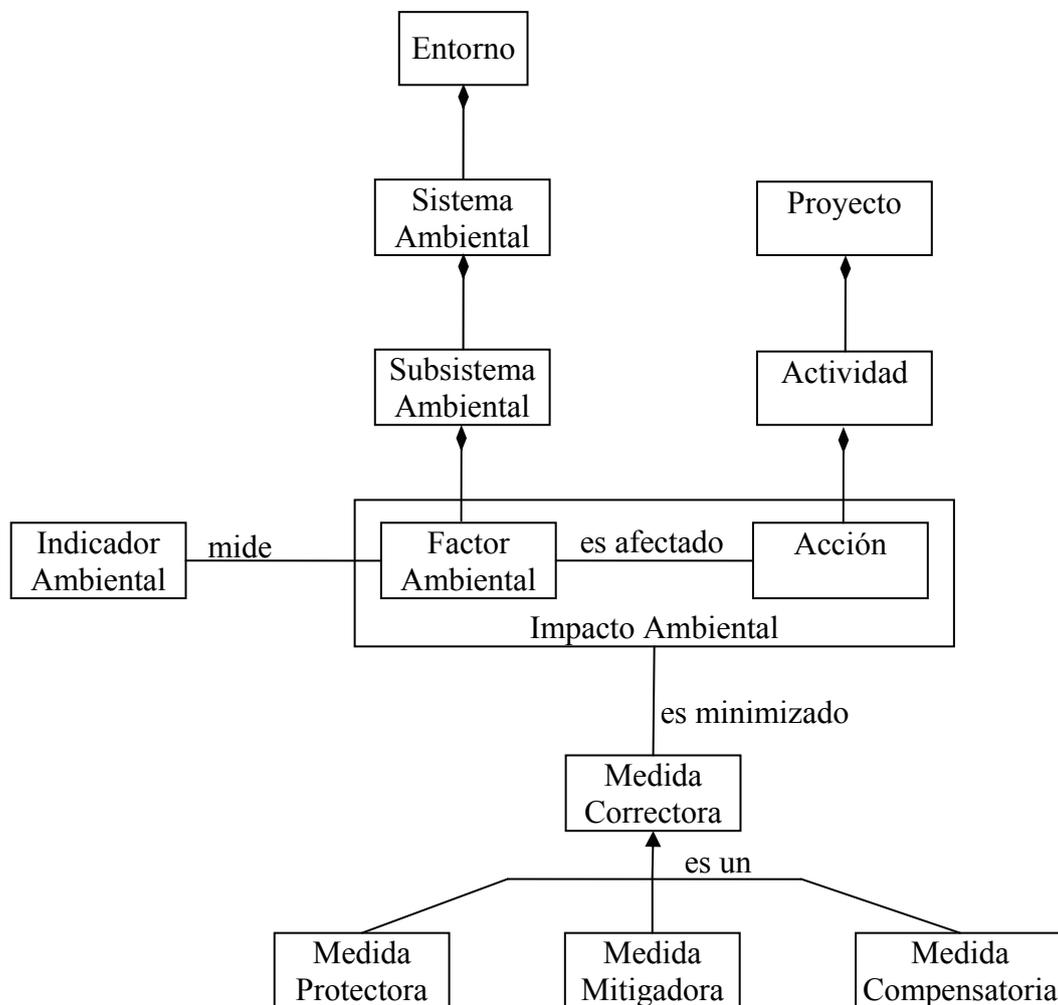


Fig. 4.3 Modelo del dominio de las evaluaciones de impacto ambiental

Esta base de conocimiento permitirá responder, entre otras, las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las acciones ejecutadas en un proyecto minero?
- ¿Cuáles son los factores ambientales afectados por determinada acción?
- ¿Qué impactos produce una acción determinada en el entorno?
- ¿Qué medidas pueden utilizarse para minimizar un impacto determinado?

Tras la conceptualización del dominio de las evaluaciones de impacto ambiental mineras, fue formalizado este conocimiento para el diseño del sistema que se presenta; fueron utilizados los frames (marcos) incluidos en una red semántica como forma para su representación ([12], [34]).

El desarrollo de la base de conocimiento tuvo como punto de partida conceptos generales que fueron especializándose o generalizándose a partir de las necesidades particulares de cada caso.

Además de las relaciones entre los conceptos presentados en la figura anterior, fue necesario crear otras jerarquías de conceptos que incluyeran conceptos más particulares. Estas jerarquías de generalización/especialización incluyen elementos de los conceptos Subsistema Ambiental, Sistema Ambiental, Factor Ambiental, Actividad y Acción.

Una vez identificados los conceptos y sus relaciones relevantes para la base de conocimiento que se construye, fueron identificadas sus propiedades, lo que finalmente permitió definir las clases para representarlos.

La base de conocimiento fue desarrollada utilizando el editor de bases de conocimientos Protégé (<http://protege.stanford.edu>) [3] y el lenguaje de programación CLIPS (<http://www.ghg.net/clips/>) [5], por las facilidades que brindan ambas herramientas para la representación del conocimiento.

En los cuadros 4.1 y 4.2 se muestran la descripción estructural de la jerarquía Factor Ambiental y ejemplos de instancias de factores ambientales respectivamente, tal y como se representan en la base de conocimientos desarrollada.

Cuadro 4.1 Jerarquía Factor Ambiental

```
(defclass Factor_Ambiental
  (is-a USER)
  (role abstract)
  (single-slot descripcion
    (type STRING)
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write))
  (multislot indicadores
    (type INSTANCE)
    (allowed-classes Indicador_Ambiental)
    (create-accessor read-write))
  (single-slot nombre
    (type STRING)
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Sistema_Ambiental
  (is-a USER)
  (role abstract)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Medio_Fisico
  (is-a Sistema_Ambiental Factor_Ambiental)
  (role abstract)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Físico")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Medio_Socioeconomico
  (is-a Sistema_Ambiental Factor_Ambiental)
  (role abstract)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Socioeconómico")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Subsistema_Ambiental
  (is-a USER)
  (role abstract))
```

Cuadro 4.1 Jerarquía Factor Ambiental (Continuación)

```
(defclass Medio_Biotico
  (is-a Subsistema_Ambiental Medio_Fisico)
  (role concrete)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Biótico")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Medio_Inerte
  (is-a Subsistema_Ambiental Medio_Fisico)
  (role concrete)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Inerte")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Medio_Perceptual
  (is-a Subsistema_Ambiental Medio_Fisico)
  (role concrete)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Perceptual")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Medio_Economico
  (is-a Subsistema_Ambiental Medio_Socioeconomico)
  (role concrete)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Económico")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))

(defclass Medio_Sociocultural
  (is-a Subsistema_Ambiental Medio_Socioeconomico)
  (role concrete)
  (single-slot medio
    (type STRING)
    (default "Medio Sociocultural")
    (cardinality 0 1)
    (create-accessor read-write)))
```

Cuadro 4.2 Ejemplos de instancias de la Base de Conocimientos

```
([Economía] of Medio_Economico

  (indicadores
    [Calidad_de_Vida]
    [Nivel_de_Empleo]
    [Nivel_de_Inversiones]
    [Valor_del_Suelo])
  (nombre "Economía"))

([Poblacion] of Medio_Sociocultural

  (indicadores
    [Nivel_de_Empleo]
    [Salud_e_Higiene])
  (nombre "Población"))
```

Además de esta descripción del dominio se utilizan reglas de producción para la representación de la información brindada por los expertos relacionada con la necesidad o no de aplicar medidas correctoras. Por ejemplo, las reglas que se presentan a continuación:

IF

Importancia del Impacto = Compatible

THEN

No es necesario aplicar Medidas Correctoras.

IF

Importancia del Impacto = Moderado

THEN

Es aconsejable aplicar Medidas Correctoras,
Seleccionar Medidas Correctoras.

A manera de resumen, la base de conocimiento contiene la siguiente información:

- Jerarquía de actividades y acciones de un proyecto minero (figura 2.1)
- Jerarquía de sistemas ambientales, subsistemas ambientales y factores ambientales afectados por un proyecto minero (figura 2.2)
- Indicadores ambientales utilizados para cuantificar la calidad ambiental de los factores ambientales (Anexo III), de los cuales se conoce los límites permisibles y la función de transformación.

- Impactos ambientales provocados por la actividad minera, de los cuales se conoce la acción que lo provoca, el factor ambiental afectado y las medidas utilizadas para su mitigación.
- Criterios para la aplicación de medidas correctoras.

Esta base de conocimiento puede ser fácilmente extendida con información de otros tipos de proyectos.

Adquisición del conocimiento

La adquisición del conocimiento es la acción de capturar la experticia de personas u otras fuentes de conocimiento y crear almacenes computacionales de este conocimiento que puedan ser utilizados por la organización para fines específicos. Dicho de otra manera, es el proceso de extracción, codificación y verificación del conocimiento obtenida de diferentes fuentes para el desarrollo de una base de conocimiento. [58]

El conocimiento puede ser extraído a través de la identificación, conceptualización e inducción del conocimiento obtenido de expertos, artículos, informes técnicos, libros, entre otros. Generalmente, este es un proceso arduo y que consume gran cantidad de tiempo, y es reconocido como el cuello de botella en el desarrollo de sistemas basados en conocimiento. En consecuencia, una adquisición del conocimiento efectiva es vital. [11]

Las fuentes de conocimiento utilizadas para el desarrollo del sistema que se presenta, fueron los expertos ambientales, la revisión de documentos referentes a las evaluaciones de impacto ambiental para la minería y la observación del proceso en sí.

La bibliografía revisada comprende literatura referida al proceso de la Evaluación de Impacto Ambiental, tesis e informes técnicos de evaluaciones de impacto ambiental para zonas mineras.

Para lograr una mejor comunicación con los expertos ambientales fueron diseñados cuestionarios, lo que permitió obtener sus criterios acerca de la evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros y sus sugerencias de las estrategias a seguir para minimizar los impactos de la minería.

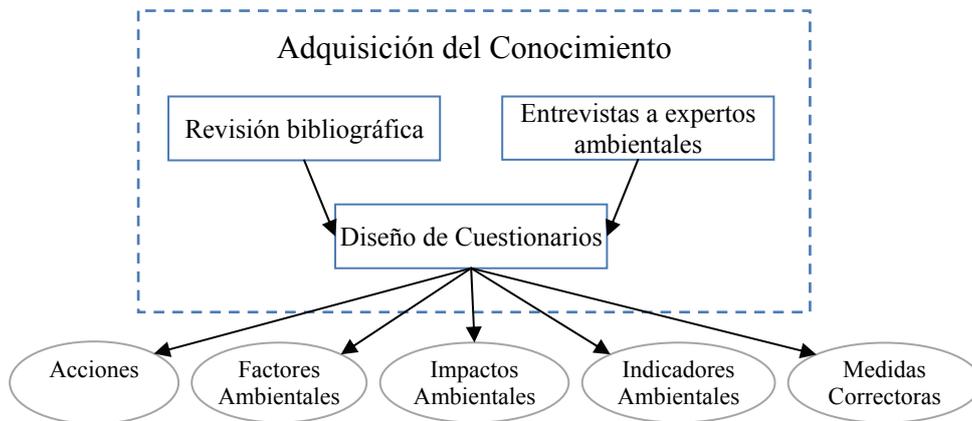


Fig. 4.4 Proceso de Adquisición del Conocimiento

Finalmente, fueron identificados los elementos de conocimientos relevantes para el sistema que se desarrolla. En este proceso se extrajeron los conceptos fundamentales, sus atributos y las relaciones entre ellos. Los conceptos identificados son:

- Acción del proyecto,
- Factor Ambiental,
- Indicador Ambiental,
- Impacto Ambiental, y
- Medida Correctora.

En el Capítulo 2 se muestra en detalles las encuestas realizadas y los componentes de cada uno de los conceptos identificados.

4.2.2 Módulo: Identificación

Implementa la etapa identificación, la cual es de gran interacción con el usuario, pues se realiza la descripción del proyecto. El usuario identifica (o selecciona) las acciones que tendrán lugar en su proyecto. Con esta información el sistema consulta la base de conocimiento y obtiene los factores ambientales afectados y los posibles impactos que provocará el proyecto sobre el entorno.

Luego de seleccionados los factores ambientales afectados, el usuario asigna las unidades de importancia relativa al entorno.

En este módulo se implementan un conjunto de funciones que permiten la comunicación con la Base de Conocimiento y realizar consultas sobre ella. Las funciones implementadas permiten:

- Obtener las actividades que se desarrollan en un proyecto minero.
- Obtener las acciones que se desarrollan en determinada actividad.
- Obtener el listado de los factores afectados por una acción determinada.
- Obtener los posibles impactos provocados por una acción especificada sobre un factor ambiental determinado.

Además, es en esta etapa el usuario del sistema identifica los hitos del proyecto, para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental durante el tiempo de vida del proyecto. Por defecto el sistema asume que las re-evaluaciones se realizarán cada seis meses.

Los datos obtenidos de la interacción con el usuario quedan almacenados en el módulo *Modelo del Proyecto*.

4.2.3 Módulo: Valoración y Predicción

Una vez caracterizado el proyecto, se procede a la valoración de los impactos ambientales y se predice cómo el proyecto afectará el entorno.

Inicialmente es necesaria la interacción con el usuario, pues se realiza la valoración cualitativa de las variables involucradas en el cálculo de la importancia del impacto. Esta valoración la realiza el usuario a través de la asignación de valores lingüísticos a las variables del cálculo de la importancia. El usuario puede realizar este proceso por impacto individual o valorando el efecto de una de las acciones sobre los factores ambientales. Por defecto se asumen las variables listadas en la tabla 2.1, no obstante el sistema brinda facilidades para la configuración de las funciones de razonamiento aproximado y las etiquetas lingüísticas que se utilizarán en la valoración.

Después de realizar la valoración de las variables se realiza el cálculo de la importancia del impacto utilizando un sistema de computación con palabras basado en aritmética difusa. Una vez obtenidos estos resultados, se realizan las predicciones globales de los efectos del

proyecto en el entorno (valoración total y por hitos del proyecto), para ellos se brindan los siguientes indicadores:

- Importancia media
- Importancia absoluta
- Importancia media relativa al entorno
- Importancia ponderada

En esta etapa también se realiza la valoración cuantitativa de los impactos ambientales. Inicialmente, el usuario asigna los valores que toman los indicadores ambientales cuando el proyecto aún no se está ejecutando. Luego, el usuario realiza la predicción de los valores que podrían tomar los indicadores ambientales durante la ejecución del proyecto. Con estos datos se pueden obtener los indicadores siguientes:

- Magnitud total
- Calidad ambiental
- Valor del impacto
- Efecto Total (predicho, calculado y de las medidas correctoras)

Este módulo utiliza sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa para el cálculo de los indicadores mencionados anteriormente.

4.2.4 Módulo: Corrección

Luego de ser realizada la predicción del impacto ambiental a partir de los resultados obtenidos se valora la necesidad de añadir medidas correctoras al proyecto. La inclusión de las medidas correctoras debe permitir mantener el valor del impacto ambiental en el umbral de aceptación.

El sistema sugiere que se ejecute el proceso de selección de las medidas correctoras teniendo en cuenta las reglas acerca de la inclusión o no de medidas correctoras al proyecto obtenidas de las entrevistas realizadas a los expertos ambientales. A partir de la identificación de los factores ambientales más afectados, se muestra una lista de los impactos negativos provocados por el proyecto, ordenados por etapas y acciones. Se permite al usuario hacer la selección y evaluación de las medidas correctoras con distinto nivel de detalle:

- Para el proyecto: lo cual permite reducir el valor del impacto del proyecto, lo que traerá como consecuencia que al finalizar el proyecto el entorno quede con el estado deseado.
- Por hitos del proyecto: permite reducir el valor del impacto ambiental para el hito de estudio.
- Por etapas: permite reducir el valor del impacto de la etapa de estudio.
- Por acciones: permite reducir el valor del impacto que provoca la acción sobre el medio ambiente.

Estos análisis pueden dividirse a su vez para su realización de manera jerárquica por factor ambiental, subsistema ambiental, sistema ambiental y medio ambiente.

El proceso de corrección se realiza en dos etapas. Primero, se realiza la caracterización de las medidas correctoras a través de la estimación de la importancia del impacto corregido, es decir, se calcula cómo debe ser la importancia de un conjunto de impactos individuales para que la importancia global esté dentro de los límites aceptables. Corresponde a los expertos ambientales identificar a cuáles impactos se les podría modificar su importancia. En el caso de que no resulte viable modificar la importancia de los impactos existentes, se incluye una acción genérica de impacto modificable “Medida Correctora” y se realiza el análisis. Estos métodos no son excluyentes.

El análisis de las medidas correctoras suponiendo que pueden modificarse los efectos producidos por el proyecto permite la caracterización de las medidas correctoras para la protección del entorno. El análisis de las medidas correctoras a partir de la inclusión de nuevas acciones al proyecto permite la caracterización de las medidas correctoras para la mitigación de los impactos.

Para la caracterización de las medidas correctoras se utilizan sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa con razonamiento inverso.

En la segunda etapa del proceso de corrección corresponde seleccionar cuáles serán las medidas que se utilizarán en el proyecto en cuestión y valorar el efecto de su utilización.

4.2.5 Herramientas utilizadas

Para la implementación del software que se presenta fueron escogidas herramientas libres, siguiendo la política de migración al software libre de la universidad de Moa.

El software fue implementado utilizando el lenguaje de programación Java [28], utilizando la plataforma J2SE (Java 2 Standard Edition, <http://java.sun.com/j2se>) y el entorno de desarrollo Eclipse (<http://www.eclipse.org>).

J2SE (<http://java.sun.com/j2se>): La plataforma de Java está compuesta por dos elementos: la máquina virtual (JVM, Java Virtual Machine) y las interfaces de programación de aplicaciones de Java (Java API, Application Programming Interface), estos elementos permiten que el código sea portable entre diferentes sistema operativos.

Eclipse (<http://www.eclipse.org>) [50]: Es un entorno integrado de desarrollo (IDE), una clase de plataforma universal, abierta y extensible para, tal y como se define en su sitio web oficial, cualquier cosa y para nada en particular. Su arquitectura de plugins permite, además de integrar diversos lenguajes sobre un mismo IDE, introducir otras aplicaciones accesorias que pueden resultar útiles durante el proceso de desarrollo como: herramientas UML, editores visuales de interfaces, ayuda en línea para librerías, etc.

La base de conocimiento fue desarrollada utilizando el lenguaje de programación CLIPS (<http://www.glg.net/clips/>) [5] y el entorno de desarrollo Protégé (<http://protege.stanford.edu>) [3], por las facilidades que brinda para la representación del conocimiento, además la herramienta CLIPS Java Native Interface (CLIPSJNI) permite su rápida utilización desde Java.

Protégé (<http://protege.stanford.edu>) [3]: Protégé es un entorno integrado para el desarrollo de sistemas basados en el conocimiento desarrollado en la división de Informática Médica de la Universidad de Stanford. Provee funcionalidades para la edición de clases, slots (propiedades) e instancias. Una de sus principales fortalezas es que automáticamente pueden generarse interfaces de usuario y así favorecer la adquisición del conocimiento. Soporta un amplio rango de lenguajes para la representación del conocimiento, tales como: CLIPS/COOL, XML Schema, UML, RDF, OWL.

CLIPS (<http://www.glg.net/clips/>) [5]: CLIPS (C Language Integrated Production System) es una herramienta para el desarrollo de sistemas expertos cuyos orígenes se remontan a 1985. Entre sus principales características podemos mencionar:

- Provee una herramienta consistente que permite la manipulación de una amplia variedad de formas de representación del conocimiento, que incluye los paradigmas basados en reglas, orientados a objetos y procedurales/funcionales.
- Puede ser utilizado en diversos sistemas operativos sin necesidad de realizar cambios en el código.
- El código escrito en CLIPS puede ser embebido en código procedural escrito en otro lenguaje, llamado como una subrutina e integrado con lenguajes como C, Java, FORTRAN y ADA.
- Provee herramientas para debuggear el código y ayuda online.
- Incluye herramientas que permiten la verificación y validación de los sistemas desarrollados, tales como el diseño modular y particionado de la base de conocimientos, chequeo dinámico y estático de restricciones, análisis semántico de los patrones de las reglas, entre otras.
- Está ampliamente documentado, incluyendo el Manual de Referencia y la Guía de Usuario.
- Además es una herramienta libre y de código abierto.

CLIPSJNI (<http://www.ghg.net/clips/>): permite la integración de CLIPS y Java.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

En la presente sección se describe brevemente el módulo de interacción con el usuario del sistema *SIAM* (Sistema para la evaluación de Impacto Ambiental) en su versión para proyectos mineros desarrollado para implementar la metodología para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental.

El sistema informático que se propone permite realizar una evaluación de impacto ambiental integral de proyectos mineros, que incluye el seguimiento en el tiempo de la variación de los impactos ambientales en diferentes etapas del proyecto. Al igual que su antecesor TDEIA, permite el agrupamiento jerárquico de acciones del proyecto y factores ambientales, y la obtención de los valores de los indicadores utilizados para las valoraciones aproximada y detallada, como son la importancia del impacto, la magnitud del impacto, efecto

ambiental, entre otros, con diferentes niveles detalle, ya sea de manera global como por hitos del proyecto. Este sistema permite además la generación automática del informe de la evaluación de impacto ambiental, que contiene sugerencias acerca de las medidas correctoras que pueden aplicarse para la mitigación de los impactos ambientales.

Para facilitar la utilización del software por los expertos ambientales, que a la postre son los usuarios del sistema, se incluye la ayuda en línea, documento que detalla sus funcionalidades principales.

A continuación se describe, de manera general, el funcionamiento del sistema. Para una mejor comprensión de los elementos que se presentan, estos son presentados en función de la tarea del sistema con la que interactúan.

La pantalla inicial del sistema contiene tres pestañas dispuestas horizontalmente que representan los elementos fundamentales de la metodología:

- Identificación
- Matriz de Impactos
- Evaluación Temporal

4.3.1 Pestaña: Identificación

Permite realizar la caracterización del proyecto. Se identifican las acciones del proyecto, los factores ambientales afectados y los posibles impactos que provocará el proyecto sobre el entorno.

Contiene cuatro pestañas:

- Generalidades, que permite la introducción al sistema de las características generales del proyecto, tales como nombre, descripción, objetivos, entre otras. (figura 4.5).
- Acciones del proyecto: el usuario selecciona las acciones que se ejecutarán en su proyecto. (figura 4.6)
- Descripción del medio ambiente: Se muestran los factores afectados por el proyecto teniendo en cuenta la influencia de las acciones seleccionadas por el usuario. El usuario asigna pesos a los factores ambientales, según la importancia de los mismos con respecto al medio ambiente. (figura 4.7)

- Impactos ambientales: Se muestran los posibles impactos que puede provocar el proyecto sobre el medio ambiente. Se brinda la posibilidad al usuario de agregar nuevos impactos y de eliminar impactos ambientales que no considere relevantes para su estudio. Se brinda información acerca de las acciones que provocan el impacto y los factores ambientales que lo reciben. Además, se permite realizar la valoración de la magnitud y la importancia del impacto, aunque estas no son acciones de la etapa de identificación, estos enlaces resultan muy útiles para el usuario (figura 4.8). Los botones Importancia y Magnitud de la pantalla Impactos Ambientales muestran la pantalla Valoración del Impacto Ambiental (figura 4.9), que permite realizar la Valoración Aproximada y la Valoración Detallada del impacto seleccionado.

The screenshot displays the 'Evaluación de Impacto Ambiental' application window. The title bar reads 'Evaluación de Impacto Ambiental'. The menu bar includes 'Proyecto', 'Vistas', 'Cálculos', 'Reportes', 'Configuración', and 'Salir'. The 'Identificación' tab is active, with sub-tabs for 'Identificación', 'Matriz de Impactos', and 'Evaluación Temporal'. A left-hand navigation pane lists 'Generalidades', 'Acciones del Proyecto', 'Descripción del Medio Ambiente', and 'Impactos Ambientales'. The main content area is titled 'Generalidades' and contains the following fields:

- Proyecto:** Yacimiento Punta Gorda
- Tipo de Proyecto:** Proyecto Minero (dropdown menu)
- Emplazamiento:** Punta Gorda
- Contratante:** (empty text box)
- Contratista:** (empty text box)
- Descripción del proyecto:** (empty text area)
- Objetivos del proyecto:** Identificar e interpretar los impactos producidos por la extracción minera en el yacimiento.

A 'Guardar' button is located at the bottom right of the form.

Fig. 4.5 Identificación: Pestaña Generalidades

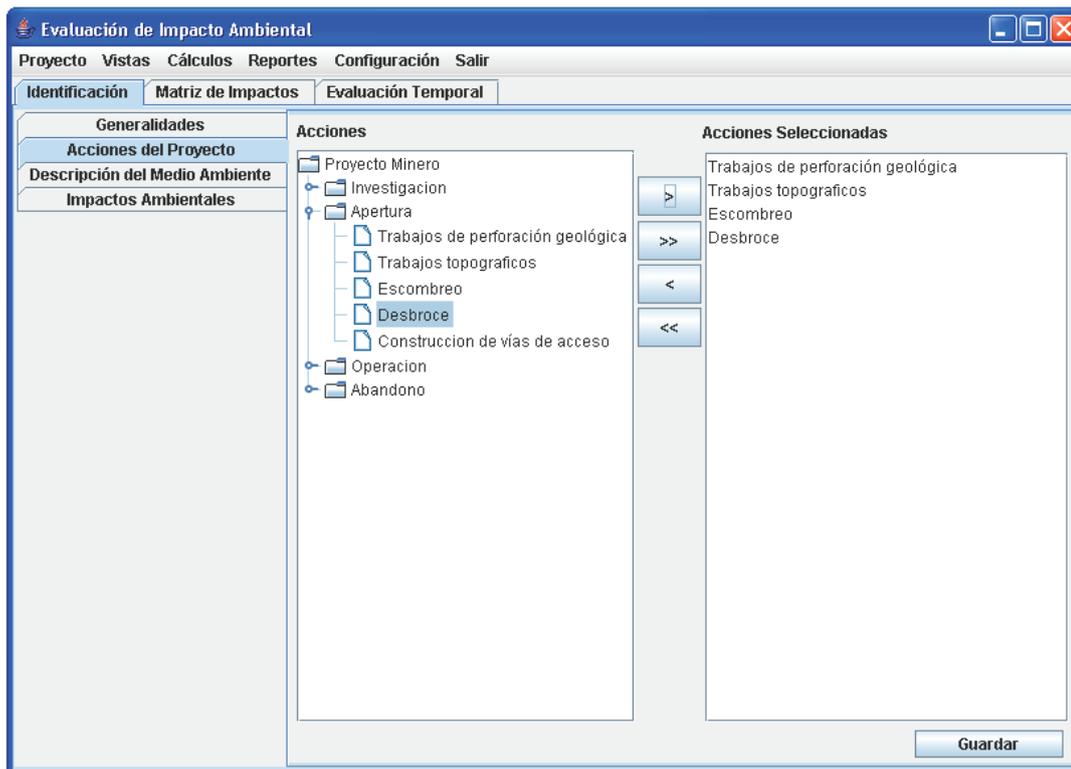


Fig. 4.6 Identificación: Pestaña Acciones del Proyecto

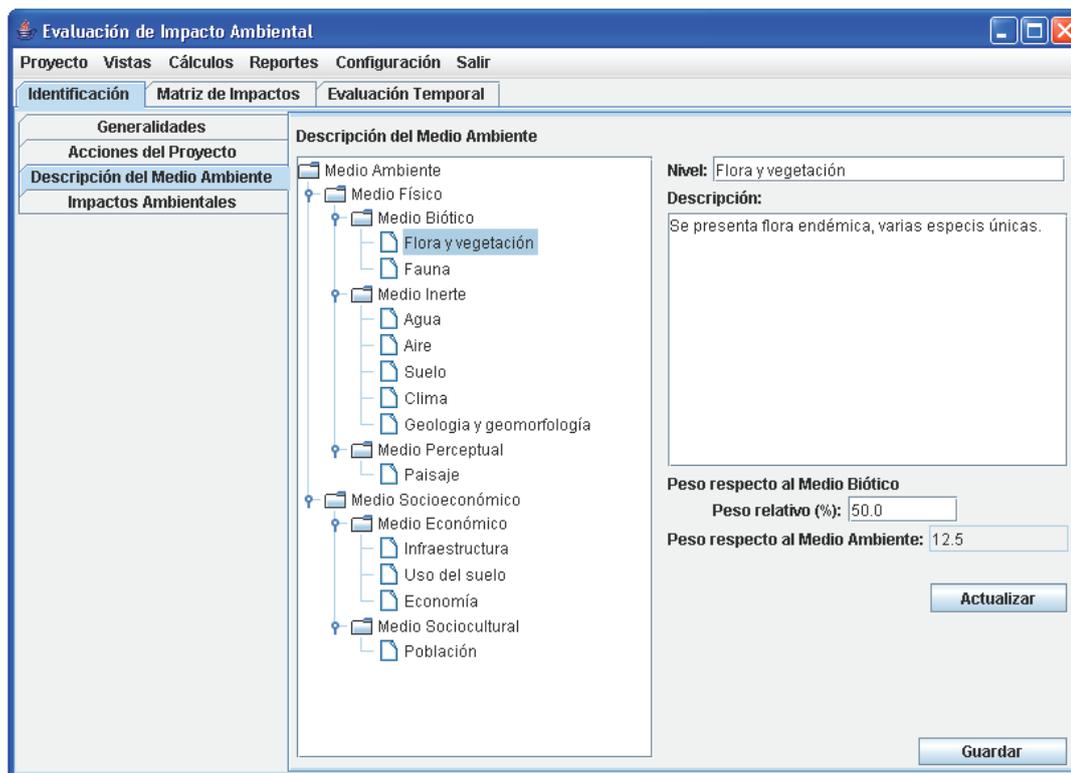


Fig. 4.7 Identificación: Pestaña Descripción del Medio Ambiente

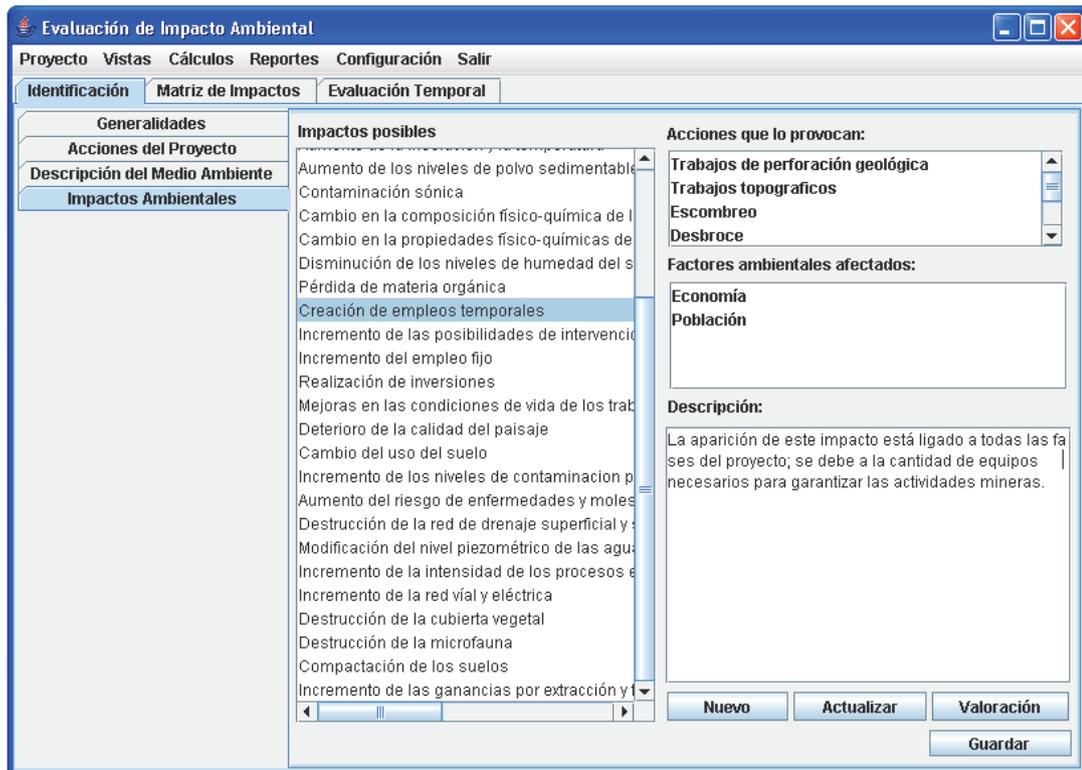


Fig. 4.8 Pantalla Impactos Ambientales

Valoración del Impacto Ambiental

Impacto Ambiental: Afectación a la diversidad

Provocado por: Trabajos de perforación geológica, Desbroce, Trabajos topograficos

Sobre los factores: Fauna, Flora y vegetación

Valoración Aproximada | Valoración Detallada

Naturaleza del Impacto: negativa

Variables: Intensidad, Extensión, Momento, Persistencia, Reversibilidad, Sinergia, Acumulacion, Efecto, Recuperabilidad, Periodicidad

Valoración: Palabra: Alta, Número:

Importancia del Impacto

Interpretación Resumida:	Moderado
Interpretación Ampliada	Poco posiblemente (0.08) Severo
	Muy posiblemente (1.00) Moderado
	Posiblemente (0.57) Irrelevante

Calcular Importancia | Ver Resultado

Fig. 4.9 Pantalla Valoración del Impacto Ambiental

4.3.2 Pestaña: Matriz de Impactos

En esta pantalla se muestra la Matriz de Impactos. En la primera columna se muestran los factores ambientales, en la segunda las unidades de importancia con respecto al entorno y seguidamente, las acciones del proyecto. Cada celda acción-factor muestra el valor correspondiente al indicador presentado en la parte superior izquierda de la tabla. Al hacer doble clic en estos elementos se muestra la pantalla Valoración del Efecto Ambiental cuya funcionalidad se explicará más adelante.

La lista desplegable Hito del Proyecto permite seleccionar para qué hito se presentará la matriz de impactos.

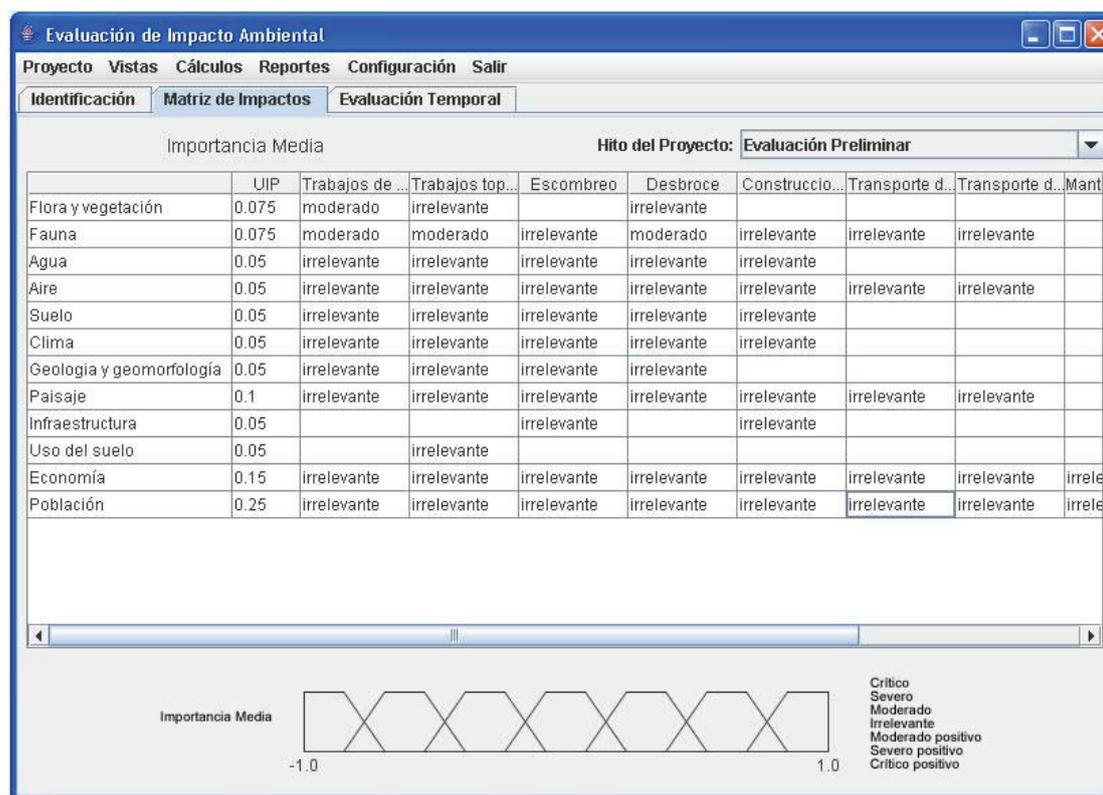


Fig. 4.10 Pestaña Matriz de Impactos

Esta pantalla tiene como elementos auxiliares los menús Cálculos y Vistas, que a continuación se explican.

Menú Cálculos

Permite al usuario seleccionar el indicador que será utilizado para la valoración de los efectos ambientales en la Matriz de Impactos. Este menú contiene los elementos siguientes:

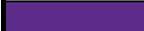
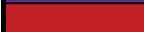
- Importancia Media
- Importancia relativa al entorno
- Importancia absoluta
- Importancia media ponderada
- Magnitud total
- Calidad ambiental
- Valor ambiental

Menú Vistas

Los elementos de este menú permiten la configuración visual de la matriz de impactos ambientales. Estos son:

- *Texto*: Muestra el valor de las celdas de la matriz de impacto como texto, en este caso se muestra la etiqueta lingüística correspondiente.
- *Numérico*: Muestra el valor de las celdas de la matriz de impactos como un número.
- *Intervalo*: Muestra el valor de las celdas de la matriz de impactos como un intervalo.
- *Escala de Colores*: Muestra la representación gráfica del valor de las celdas de la matriz de impactos utilizando la escala de colores mostrada en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Escala de colores para clasificar la Importancia del Impacto

Color	Importancia del Impacto (<i>I</i>)
	Crítica
	Severa
	Moderada
	Compatible
	Moderada +
	Severa +
	Crítica +

- *Acciones*: Permite modificar el nivel en la jerarquía de acciones del proyecto, contiene los elementos Expandir y Contraer, que sirven para aumentar o disminuir un nivel respectivamente.
- *Factores*: Permite modificar el nivel en la jerarquía de factores ambientales, contiene los elementos Expandir y Contraer, que sirven para aumentar o disminuir un nivel respectivamente.

Formulario Valoración del Efecto Ambiental

Este formulario permite que el usuario realice las valoraciones aproximada y detallada de los efectos provocados por las acciones sobre los impactos ambientales (Figuras 4.11 y 4.12).

La primera pestaña permite valorar las variables lingüísticas utilizadas para el cálculo de la importancia del impacto, el segundo permite realizar la predicción de los valores que pueden tomar los indicadores ambientales utilizados para medir el factor que se evalúa.

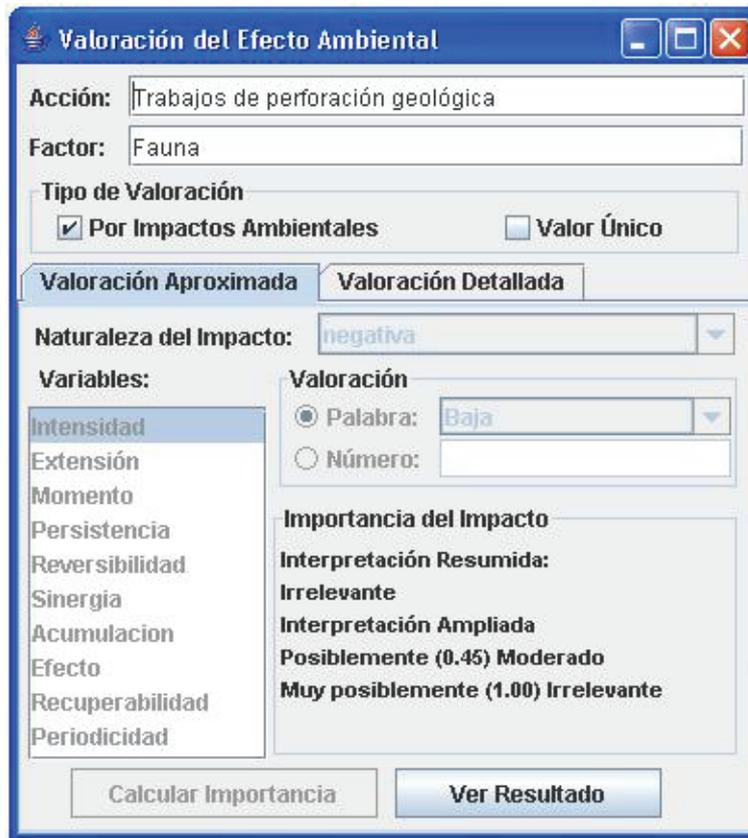


Fig. 4.11 Valoración aproximada del impacto ambiental

El selector *Tipo de Valoración* permite la valoración del efecto ambiental a través de un único valor o a través de la agregación de la valoración de todos los impactos ambientales que provoca la acción del proyecto que se evalúa sobre el factor ambiental. La valoración de los impactos individuales se realiza en la pestaña secundaria Impactos Ambientales de la pestaña Identificación.

Valoración del Efecto Ambiental

Acción: Trabajos de perforación geológica

Factor: Suelo

Valoración Aproximada Valoración Detallada

Indicador: Espesor de la capa fértil

Mínimo: 0 Máximo: 100 Unidades: %

Calidad Ambiental

Magnitud 0 100 %

Valoración

Palabra: Media

Número:

Aceptar

Fig. 4.12 Valoración detallada del impacto ambiental

4.3.3 Pestaña: Evaluación Temporal

A través de esta pestaña el usuario puede calcular el efecto total para cada hito del proyecto.

Se brinda al usuario la posibilidad de seleccionar el tipo de evaluación que realizará:

- Valor único: se hace la predicción de los valores totales de importancia y magnitud para el hito del proyecto que se evalúa.
- Por acciones: se evalúan la importancia y la magnitud de los impactos que produce cada acción de las que se ejecutan durante el hito.
- Por impactos: se evalúan la importancia y la magnitud de los impactos que se producen durante el hito del proyecto.

Evaluación de Impacto Ambiental

Proyecto Vistas Cálculos Reportes Configuración Salir

Identificación Matriz de Impactos **Evaluación Temporal**

Tipo de evaluación:
 Valor Único Por Acciones Por Impactos << Hito Anterior Hito Siguiente >>

Evaluación para el Hito 1
 Efecto Predicho Efecto Calculado Efecto de las Medidas Correctoras

Importancia
Variables: Tipo de Impacto: **Negativo** La Importancia es:
Poco posiblemente (0.11) Crítica
Muy posiblemente (1.0) Severa
Posiblemente(0.5) Moderada

Intensidad
Extensión
Sinergia
Efecto
Reversibilidad

Valoración:
 Palabra: **Alta**
 Número: []

Ver Resultado

Magnitud
Indicadores Ambientales:
Material particulado en el aire
Ruido
Turbidez (Agua)
Nivel de compactación del suelo
Diversidad de especies

Valoración:
 Palabra: **Media**
 Número: []

La Magnitud es:
Poco posiblemente (0.11) Baja
Posiblemente (0.52) Aceptable
Muy Posiblemente(1.0) Alta

Ver Resultado

Efecto Total
Posiblemente (0.6) Moderado
Muy posiblemente (1.0) Severo
Posiblemente(0.4) Crítico

0.0 1.0

Fig. 4.13 Pestaña Evaluación Temporal

4.3.4 Menú Configuración

Este menú permite realizar la configuración de las variables lingüísticas que se utilizarán en el proceso de evaluación de impacto ambiental. La configuración de las variables lingüísticas tiene dos etapas: definir los datos generales de las variables y definir las etiquetas y los números difusos asociados a cada una de ellas. A continuación se muestran los formularios utilizados para cada uno de esos casos.

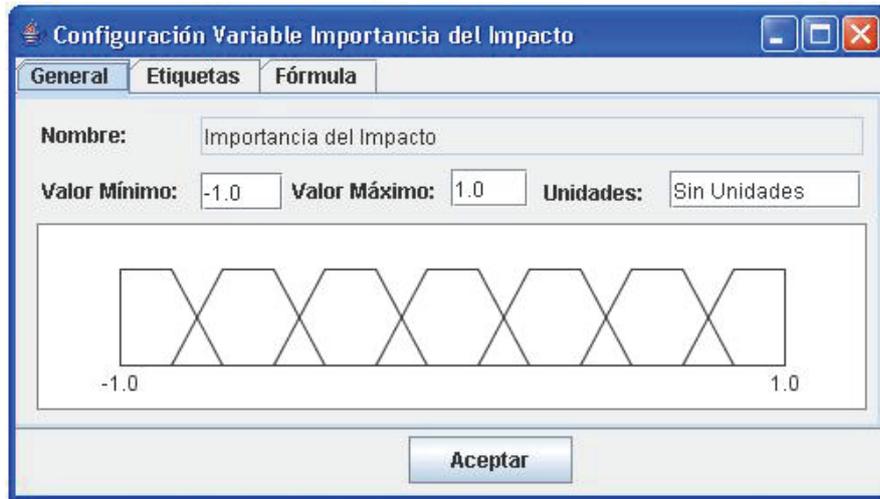


Fig. 4.14 Configuración de las variables lingüísticas. Pestaña General.

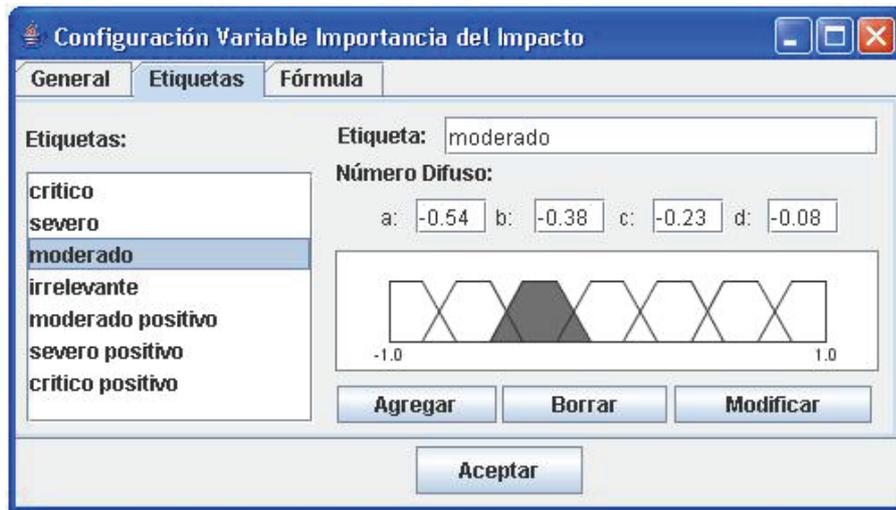


Fig. 4.15 Configuración de las variables lingüísticas. Pestaña Etiquetas.

En el caso de la variable lingüística Importancia del Impacto es necesario un paso adicional: definir las variables que se utilizarán en el cálculo de la importancia y sus propiedades en la fórmula de la importancia.

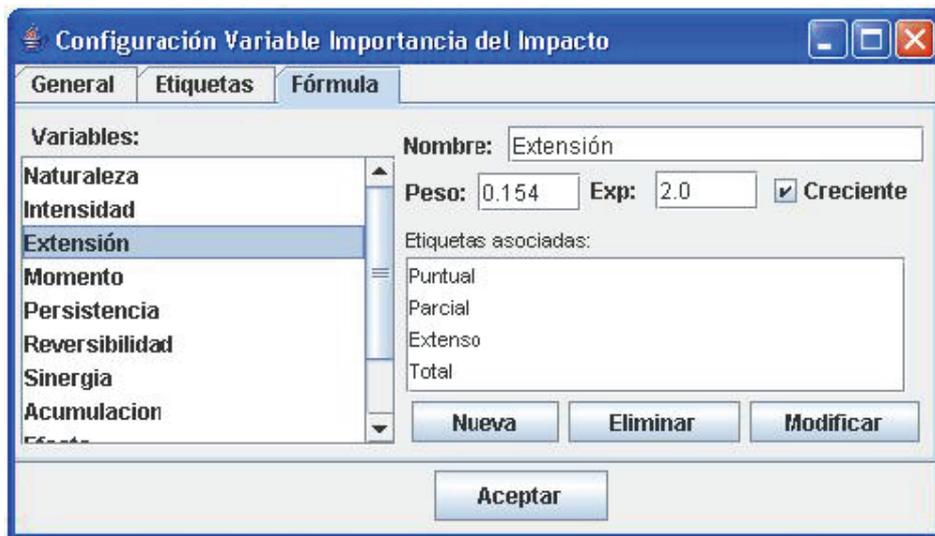


Fig. 4.16 Configuración de la fórmula para el cálculo de la Importancia del Impacto

4.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL YACIMIENTO PUNTA GORDA

En la presente sección se muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología propuesta en el apartado 3.4 a un caso de estudio de la industria minera: el proyecto Yacimiento Punta Gorda. Se utiliza como herramienta para facilitar el procesamiento de los datos el software SIAM, desarrollado como resultado de la presente investigación. Se muestra la evaluación preliminar del proyecto, utilizando el método difuso simple y el método difuso por hitos, y seguidamente se realiza la evaluación en el tiempo para un hito del proyecto.

La evaluación que se presenta en este capítulo tiene como antecedentes la evaluación de impacto ambiental utilizando la metodología de Conesa modificada presentada en [46] y evaluación de impacto ambiental utilizando técnicas difusas presentada en ([23], [76]) realizadas al yacimiento tomado como caso de estudio.

4.4.1 Evaluación Inicial de Impacto Ambiental

Esta etapa tiene como objetivo fundamental predecir la importancia y la magnitud del impacto ambiental que produce el proyecto sobre el entorno.

Para ello inicialmente se realiza la identificación de las acciones que se llevarán a cabo en el proyecto, los factores ambientales afectados y los posibles impactos ambientales. Seguidamente, se hace la predicción de la importancia y la magnitud de los impactos ambientales. Esta predicción puede realizarse utilizando la metodología difusa presentada en el Capítulo 2 o la predicción en el tiempo presentada en el Capítulo 3. Para distinguir estos métodos en las secciones subsiguientes serán referidos como método difuso simple y método difuso por hitos respectivamente.

Como colofón de esta etapa se encuentra la selección de las medidas correctoras, que incluye el análisis de la importancia de las medidas correctoras y la selección de las medidas que se incluirán en el plan de manejo ambiental del proyecto.

Identificación de las acciones del proyecto

Para la identificación de las acciones del Proyecto se realizó la siguiente jerarquía (tabla 4.2):

- Proyecto
- Actividad
- Acción

Tabla 4.2 Jerarquía de acciones del proyecto Yacimiento Punta Gorda

Proyecto
<i>Actividad</i>
Acción
Yacimiento Punta Gorda
<i>Actividad A1: Apertura</i>
Acción AC1: Trabajos Topográficos
Acción AC2: Trabajos de Perforación Geológica
Acción AC3: Desbroce
Acción AC4: Construcción de Vía de Acceso
Acción AC5: Escombreo
<i>Actividad A2: Operación</i>
Acción AC6: Extracción del Mineral
Acción AC7: Transporte de Maquinarias y Equipos
Acción AC8: Transporte de Mineral
Acción AC9: Mantenimiento de Caminos
<i>Actividad A3: Abandono</i>
Acción AC10: Rehabilitación de las Áreas Minadas

Identificación de los factores ambientales

La identificación de las acciones del proyecto permite identificar, utilizando el software, los factores ambientales potencialmente afectados por el proyecto. La jerarquía de factores ambientales consta de cuatro niveles, estos son:

- Entorno (Medio Ambiente)
- Sistemas Ambientales
- Subsistemas Ambientales
- Factores Ambientales

Una vez identificados los factores ambientales fueron asignadas las unidades de importancia a los componentes del entorno. Aunque en la EIA crisp no se utilizó la asignación de unidades de importancia a los componentes del entorno, para la metodología difusa éste paso resulta de necesaria importancia. Para la asignación de UIP se consultó con los expertos del territorio y a través de encuestas se calculó la importancia de cada factor ambiental. En la tabla 4.3 se muestra la jerarquía de factores ambientales del proyecto y las unidades de importancia relativa al entorno asignadas.

Tabla 4.3 Jerarquía de factores ambientales del proyecto Yacimiento Punta Gorda

Medio Ambiente <i>Sistema Ambiental</i> <i>Subsistema Ambiental</i> Factor Ambiental Impacto Ambiental	UIP (%)
Entorno	100.00
<i>SA1: Medio Físico</i>	<i>80.00</i>
<i>SS1: Medio Inerte</i>	<i>50.00</i>
FA1: Geología y Geomorfología	10.00
FA2: Suelos	10.00
FA3: Agua	10.00
FA4: Clima	10.00
FA5: Aire	10.00
<i>SS2: Medio Biótico</i>	<i>20.00</i>
FA6: Flora y Vegetación	10.00
FA7: Fauna	10.00
<i>SS3: Medio Perceptual</i>	<i>10.00</i>
FA8: Paisaje	10.00
<i>SA2: Medio Socioeconómico</i>	<i>20.00</i>
<i>SS4: Medio Sociocultural</i>	<i>15.00</i>
FA9: Uso de los Suelos	5.00
FA10: Población	5.00
FA11: Infraestructura	5.00
<i>SS5: Medio Económico</i>	<i>5.00</i>
FA12: Economía	5.00

Identificación de los impactos ambientales

La identificación de las acciones del proyecto permite identificar, utilizando el software, los posibles impactos ambientales generados por el proyecto. En el cuadro 4.3 se listan los posibles impactos que provocará el proyecto. A continuación, en la tabla 4.4, se muestra la matriz de identificación de impactos, que relaciona los factores ambientales y los impactos ambientales que reciben con las acciones que los provocan.

Cuadro 4.3 Posibles impactos ambientales que se provocarán con la ejecución del proyecto Yacimiento Punta Gorda

Impacto I1: Alteración del relieve natural
Impacto I2: Aumento de las probabilidades de ocurrencia de procesos geomorfológicos degradantes
Impacto I3: Incremento de la intensidad de los procesos erosivos
Impacto I4: Remodelación final del relieve
Impacto I5: Pérdida de materia orgánica
Impacto I6: Disminución de los niveles de humedad
Impacto I7: Cambio en las propiedades físico-químicas del suelo
Impacto I8: Compactación crítica de los suelos
Impacto I9: Remodelación y protección de taludes
Impacto I10: Descompactación de los suelos
Impacto I11: Realización de mejoras edáficas
Impacto I12: Cambios en la composición físico química en las aguas de escurrimientos superficiales (sólidos en suspensión)
Impacto I13: Modificación del nivel piezométrico de las aguas
Impacto I14: Destrucción de la red de drenaje de las aguas superficiales y subterráneas
Impacto I15: Disminución de los sólidos en suspensión en aguas
Impacto I16: Creación de las redes de drenaje de las aguas
Impacto I17: Construcción de depósitos de agua
Impacto I18: Aumento de la insolación y las temperaturas producto de las labores de minería
Impacto I19: Recuperación gradual de los parámetros afectados del microclima por la minería
Impacto I20: Aumento de los niveles de polvo
Impacto I21: Incremento de los niveles de contaminación por gases (CO)
Impacto I22: Contaminación sónica
Impacto I23: Disminución de los niveles de polvo producto de la rehabilitación biológica
Impacto I24: Disminución de las concentraciones de polvo por el riego sistemático de agua en las vías de acceso
Impacto I25: atenuación de la contaminación por gases en la fase de abandono
Impacto I26: Mitigación de la contaminación sónica
Impacto I27: Tala de árboles y arbustos
Impacto I28: Destrucción de la cubierta vegetal
Impacto I29: Destrucción y fragmentación de hábitat de la flora, vegetación y fauna
Impacto I30: Destrucción de especies endémicas

**Cuadro 4.3 Posibles impactos ambientales que se provocarán con la ejecución
del proyecto Yacimiento Punta Gorda (Continuación)**

Impacto I31: Afectación a la diversidad

Impacto I32: Realización de rehabilitación biológica

Impacto I33: Revegetación espontánea de algunas especies vegetales

Impacto I34: Migración de especies animales

Impacto I35: Destrucción de la microfauna

Impacto I36: Aparición de algunas especies animales (reptiles y aves pequeñas)

Impacto I37: Deterioro de la calidad del paisaje

Impacto I38: Mejoramiento de la calidad paisajística

Impacto I39: Cambio del uso del suelo (de forestal a minero)

Impacto I40: Entrega de las área rehabilitadas al patrimonio forestal

Impacto I41: Aumento de riesgo de enfermedades y molestias por la acción del polvo

Impacto I42: Atenuación en las afectaciones por la acción del polvo

Impacto I43: Incremento de la red vial y eléctrica

Impacto I44: Incremento del empleo fijo

Impacto I45: Incremento de las ganancias por la extracción y transportación del mineral

Impacto I46: Creación de empleos temporales

Impacto I47: Realización de inversiones

Impacto I48: Mejoras en las condiciones de vida de los trabajadores

Impacto I49: Incremento de las posibilidades de intervención de empresas de servicio

Impacto I50: Incremento del valor del suelo

Tabla 4.4 Matriz de identificación de impactos

	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10
FA1	I1	I1	I1		I3	I3				I4
	I2	I2	I3							
FA2	I5	I5	I5	I7	I7	I7				I9
	I6	I6	I6	I8						I10
	I7	I7	I7							I11
FA3	I12	I12	I12	I14	I12	I12				I15
			I13		I13	I13				I16
			I14		I14	I14				I17
FA4	I18	I18	I18	I18	I18	I18				I19
FA5	I20		I23							
	I22	I22	I22	I21	I21	I21	I21	I21		I24
				I22	I22	I22	I22	I22		I25
FA6	I27	I27	I28							I32
	I29	I29	I29							I33
	I30	I30	I30							
	I31	I31	I31							
FA7	I34	I34	I35	I34	I34	I34	I34	I34		I36
FA8	I37		I38							
FA9	I39									I40
FA10			I41	I41	I41	I41	I41	I41		I42
FA11				I43	I43					
FA12	I44									
						I45				
	I46									
	I47									
	I48									
	I49									
	I50									

Identificación de los hitos del proyecto

Se realizarán las valoraciones periódicas en la etapa de Operación. Para este estudio se propone que los hitos sean de 12 meses, teniendo en cuenta que esta es la etapa más impactante del proyecto y en la cual se afecta más la calidad ambiental. Al iniciarse la aplicación de esta metodología se está desarrollando la etapa de Operación en la zona que se evaluará.

En lo referente a esta memoria se hará la predicción para dos hitos, cuyo tiempo inter-hitos es de 1 año (12 meses), y el diagnóstico ambiental que propone la metodología para cada hito se hará para el primer hito definido. Tras esta evaluación se conocerá el estado del medio ambiente, se podrá comprobar la efectividad de las medidas correctoras y a partir de estos resultados se valorará la necesidad de realizar cambios al proyecto.

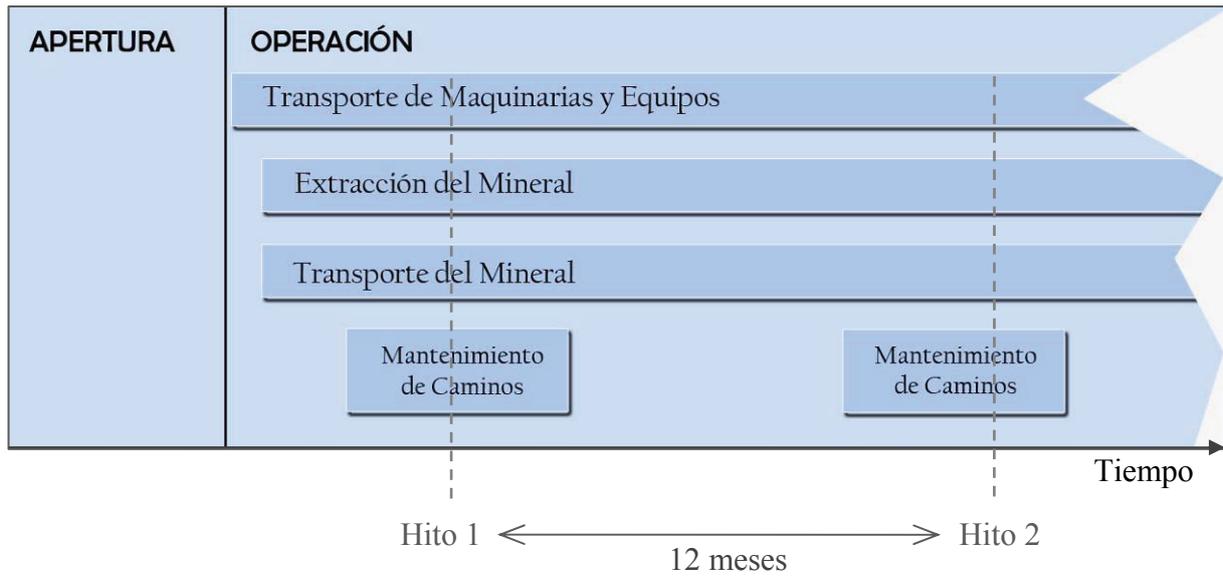


Fig. 4.17 Hitos del proyecto Yacimiento Punta Gorda

Predicción de la importancia y la magnitud del proyecto

Método difuso simple

Este método permite hacer una predicción totalizadora del impacto ambiental del proyecto. En [23] y [76] se muestra el estudio de impacto ambiental utilizando técnicas difusas, en esta sección se muestra un resumen de los resultados obtenidos. Los resultados de esta evaluación incluyen los efectos positivos que recibe en entorno en la etapa de “Rehabilitación de Áreas Minadas”.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las etapas de Valoración Aproximada (tablas 4.5 y 4.6) y Valoración Detallada (tabla 4.7) de la metodología difusa de evaluación de impacto ambiental.

En la tabla 4.5 se muestra la importancia de los impactos recibidos por los distintos factores ambientales. De ella se puede resumir que los factores ambientales que resultan más afectados resultan Geología y Geomorfología, Flora y Vegetación, y Paisaje, los cuales reciben impactos Severos. Los factores Economía y Uso del Suelo reciben impactos severos positivos, y el resto de los factores reciben impactos de importancia moderada.

En la tabla 4.6 se muestra la importancia de los impactos sobre el Medio Ambiente producidos por las distintas acciones que se desarrollan a lo largo de la ejecución del proyecto. Las acciones Mantenimiento de Caminos y Rehabilitación de Áreas minadas producen impactos severos positivos; Transporte de Mineral y Transporte de Maquinarias y

Equipos producen daños compatibles al entorno. El resto de las acciones producen daños de moderados a compatibles.

De lo anterior se puede concluir que las acciones del proyecto no dañan notablemente el entorno, sin embargo hay factores que son afectados negativamente, por lo que se hace necesario la existencia de medidas de corrección.

Tabla 4.5 Importancia de los impactos recibidos por los factores ambientales

Factores Ambientales	Importancia del Impacto	
	Interpretación Ampliada	Interp. Resumida
<i>Geología y geomorfología</i>	<i>Posiblemente (0.36) Crítica muy posiblemente (1.00) Severa muy posiblemente (0.97) Moderada</i>	<i>Severa</i>
Suelo	Posiblemente (0.46) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.89) Irrelevante	Moderada
Aguas	Posiblemente (0.59) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.72) Irrelevante	Moderada
Clima	Poco posiblemente (0.16) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante	Moderada
Aire	Poco posiblemente (0.20) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante	Moderada
<i>Flora y vegetación</i>	<i>muy posiblemente (1.00) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada Posiblemente (0.35) Irrelevante</i>	<i>Severa</i>
Fauna	muy posiblemente (0.97) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada poco posiblemente (0.30) Irrelevante	Moderada
<i>Paisaje</i>	<i>Poco posiblemente (0.23) Crítica muy posiblemente (1.00) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada poco posiblemente (0.21) Irrelevante</i>	<i>Severa</i>
<i>Uso del suelo</i>	<i>muy posiblemente (0.70) Moderada + muy posiblemente (1.00) Severa + muy posiblemente (0.73) Crítica +</i>	<i>Severa +</i>
Población	Poco posiblemente (0.22) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.88) Irrelevante	Moderada
Infraestructura	muy posiblemente (0.67) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada Posiblemente (0.44) Irrelevante	Moderada
<i>Economía</i>	<i>muy posiblemente (0.92) Moderada + muy posiblemente (1.00) Severa + poco posiblemente (0.30) Crítica +</i>	<i>Severa +</i>

Tabla 4.6 Importancia de los impactos provocados por las acciones del proyecto

Acciones del Proyecto	Importancia del Impacto	
	Interpretación Ampliada	Interp. Resumida
Trabajos Topográficos	Posiblemente (0.34) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.93) Compatible	Moderada
Trabajos de Perforación Geológica	posiblemente (0.48) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.80) Irrelevante	Moderada
Desbroce	Posiblemente (0.58) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (0.71) Irrelevante	Moderada
Construcción de Vías de Acceso	poco posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante poco posiblemente (0.18) Moderada +	Moderada
Escombreo	poco posiblemente (0.16) Severa muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante	Moderada
Extracción del Mineral	muy posiblemente (1.00) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante poco posiblemente (0.21) Moderada +	Moderada
Transporte de Maquinarias y Equipos	muy posiblemente (0.72) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante Posiblemente (0.44) Moderada +	Irrelevante
Transporte de Mineral	poco posiblemente (0.23) Moderada muy posiblemente (1.00) Irrelevante posiblemente (0.62) Moderada +	Irrelevante
<i>Mantenimiento de Caminos</i>	<i>muy posiblemente (0.94) Moderada + muy posiblemente (1.00) Severa + poco posiblemente (0.28) Crítica +</i>	<i>Severa +</i>
<i>Rehabilitación de Áreas Minadas</i>	<i>muy posiblemente (0.69) Moderada + muy posiblemente (1.00) Severa + posiblemente (0.62) Crítica +</i>	<i>Severa +</i>

Una vez realizada la Valoración Aproximada, se estableció la magnitud de los indicadores ambientales antes y después de la ejecución del proyecto. Lo que permitió obtener la Calidad Ambiental Neta por impacto producido y luego el Valor del Impacto por factor (tabla 4.7).

De la tabla 4.7 se puede resumir que los factores ambientales Geología y Geomorfología, Flora y Vegetación, y Paisaje reciben impactos valorados como malos; los factores Uso del Suelo y Economía reciben impactos valorados como buenos, mientras que el resto de los factores ambientales reciben impactos que se clasifican como normales.

Tabla 4.7 Valor del Impacto ambiental por factor ambiental

Factor Ambiental	Valor del Impacto
<i>Geología y Geomorfología</i>	<i>Malo</i>
Suelo	Normal
Aguas	Normal
Clima	Normal
Aire	Normal
<i>Flora y vegetación</i>	<i>Malo</i>
Fauna	Normal
<i>Paisaje</i>	<i>Malo</i>
Uso del suelo	Bueno
Población	Normal
Infraestructura	Normal
Economía	Bueno

Método difuso por hitos

Una vez realizada la evaluación preliminar, se realiza la predicción del efecto ambiental para los hitos del proyecto señalados. Para ello es necesario el cálculo de la importancia y la magnitud del impacto predicho. En esta oportunidad las variables que se utilizarán para el cálculo de la importancia son las listadas en la tabla 4.8.

A partir de la metodología difusa para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental mostrada en el Capítulo 3, la valoración del efecto predicho de cada hito puede estimarse de varias maneras, a continuación se listan los propuestos en esta investigación:

- A través de la estimación de los efectos ambientales de los impactos provocados en el hito que se evalúa, finalmente estimar el efecto total a partir de la agregación de los efectos individuales.
- Haciendo la estimación del efecto de las acciones que están teniendo lugar en el momento determinado, y finalmente estimar el efecto total a partir de la agregación de los efectos individuales.
- Estimando el efecto predicho del hito como elemento único.

Nótese que las dos primeras maneras resultan más detalladas, en esta memoria se utiliza el tercer método para la ejemplificación de la metodología que se propone.

Tabla 4.8 Variables lingüísticas para la estimación de la importancia del impacto predicho

Variable	Peso	Etiquetas	Números difusos
Intensidad	0.375	Baja	(0.0, 0.0, 0.11, 0.22)
		Media	(0.11, 0.22, 0.33, 0.44)
		Alta	(0.33, 0.44, 0.55, 0.66)
		Muy Alta	(0.55, 0.66, 0.77, 0.88)
		Total	(0.77, 0.88, 1.0, 1.0)
Extensión	0.25	Puntual	(0.0, 0.0, 0.14, 0.29)
		Parcial	(0.14, 0.29, 0.43, 0.57)
		Extenso	(0.43, 0.57, 0.71, 0.86)
		Total	(0.71, 0.86, 1.0, 1.0)
Sinergia	0.125	Poco Sinérgico	(0.0, 0.0, 0.2, 0.4)
		Sinérgico	(0.2, 0.4, 0.6, 0.6)
		Muy Sinérgico	(0.6, 0.4, 1.0, 1.0)
Efecto	0.125	Indirecto	(0.0, 0.0, 0.33, 0.66)
		Directo	(0.33, 0.66, 1.0, 1.0)
Reversibilidad	0.125	Corto plazo	(0.0, 0.0, 0.2, 0.4)
		Medio plazo	(0.2, 0.4, 0.6, 0.8)
		Irreversible	(0.6, 0.8, 1.0, 1.0)

La importancia del impacto se calculará utilizando la ecuación $IMP = \sum_{i=1}^n w_i g_i(x_i)$. Se propone que la función $g(x)$ sea de la siguiente manera:

$$g(x) = \begin{cases} x & \text{si } hito = 1 \\ x^{(hito-1)/hito} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En este ejemplo se realizará la predicción para los dos primeros hitos del proyecto, en este caso tiene lugar la actividad Operación.

El paso inicial es la estimación de la importancia del impacto, para ello se consultaron expertos ambientales para que valoraran las variables involucradas. La valoración obtenida se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Valoración lingüística del impacto ambiental

Variable	Valoración
Naturaleza del Impacto	Negativa
Intensidad	Total
Extensión	Extenso
Sinergia	Sinérgico
Efecto	Directo
Reversibilidad	Irreversible

Los expertos plantean que la valoración cualitativa de las variables es la misma para ambos casos, sin embargo para el segundo hito el impacto debe ser mayor, puesto que las acciones llevarán más tiempo en ejecución.

Tras el cálculo de la importancia del impacto utilizando la ecuación presentada anteriormente se obtuvo que:

- El impacto en el primer hito se valora como severo.
- El impacto en el segundo hito se valora como crítico.

En la tabla 4.10 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4.10 Valoración del impacto ambiental

Hito	Importancia del Impacto	
	Interpretación Ampliada	Interpretación Resumida
Hito 1	Muy posiblemente (1.00) Crítico Muy posiblemente (1.00) Severo Poco posiblemente (0.20) Moderado	Severo
Hito 2	Muy posiblemente (1.00) Crítico Posiblemente (0.48) Severo	Crítico

Para estimar la magnitud del impacto fue necesario que los expertos ambientales predijeran, de acuerdo a su experiencia, los valores de los indicadores ambientales. En este caso los expertos seleccionan los indicadores ambientales relevantes teniendo en cuenta el hito del proyecto que se evalúa. En la tabla 4.11 se muestra la valoración realizada por los expertos ambientales.

Tabla 4.11 Valoración de los indicadores ambientales

Indicador Ambiental	Valoración del Indicador	Valoración de la Magnitud
Superficie erosionada	Fuerte	Alta
Material particulado (concentración media en 24 horas)	Notable	Aceptable
Concentración de Monóxido de Carbono (CO)	Notable	Aceptable
Nivel de ruido	Alto	Alta
Espesor de la capa fértil	Baja	Alta
Nivel de humedad (del suelo)	Bajo	Alta
Nivel de compactación (del suelo)	Severo	Alta
Turbidez	Alta	Alta
Red de drenaje afectada	Moderada	Aceptable
Temperatura	Moderada	Aceptable
Cantidad de árboles observables	Muy escasos	Muy Alta
Diversidad de especies	Nula	Muy Alta
Uso del suelo	Bajo	Alta
Nivel de empleo	Alto	Alta
Nivel de inversiones	Notable	Aceptable
Valor del suelo (suelo afectado revalorizable)	Alto	Alta

Tras realizar los cálculos pertinentes se obtuvo que la magnitud total de los impactos en ambos hitos es valorada como Alta, utilizando el indicador Magnitud Media. Tras la valoración detallada de la magnitud se obtuvo que la magnitud es:

- Posiblemente (0.58) Media o Aceptable
- Muy posiblemente (1.00) Alta

Finalmente se realiza el cálculo del efecto ambiental predicho para ambos hitos del proyecto. Para la valoración lingüística del efecto ambiental se utilizaron las etiquetas: Nulo, Aceptable, Moderado, Severo, Crítico.

Para el Hito 1 se obtuvo que el efecto ambiental es Severo, siendo la valoración detallada la siguiente:

- Poco posiblemente (0.18) Moderado
- Muy posiblemente (1.00) Severo
- Posiblemente (0.53) Crítico

Para el Hito 2 se obtuvo igualmente que el efecto ambiental predicho es Severo, siendo la valoración detallada la siguiente:

- Muy posiblemente (1.00) Severo
- Posiblemente (0.62) Crítico

Tabla 4.12 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto Predicho

Hitos del Proyecto	Indicadores		
	Importancia del Impacto	Magnitud del Impacto	Efecto Ambiental
Hito 1	Severa	Alta	Severo
Hito 2	Crítica	Alta	Severo

4.4.2 Análisis global del impacto ambiental del proyecto

Método difuso simple

La evaluación preliminar, tras la evaluación de los posibles impactos de las acciones del proyecto sobre el entorno incluidas las medidas correctoras de la etapa de Abandono, arrojó que el impacto ambiental del proyecto es Irrelevante, siendo su valoración detallada:

- Muy posiblemente (0.94) Moderado
- Muy posiblemente (1.00) Irrelevante
- Posiblemente (0.62) Moderado Positivo

Finalmente se obtuvo el valor ambiental, que fue clasificado como Normal.

- Posiblemente (0.40) Malo
- Muy posiblemente (1.00) Normal
- Posiblemente (0.60) Bueno

Método difuso por hitos

Utilizando el método difuso por hitos, una vez realizada la predicción del efecto ambiental para los dos primeros hitos, se puede concluir que el impacto del proyecto sobre el entorno luego que se concluya el segundo hito será Crítico.

La valoración detallada por grado de pertenencia es:

- Crítico (0.80)
- Severo (0.20)

A partir de los resultados obtenidos se concluye la necesidad de aplicar medidas correctoras al proyecto en estas etapas de su desarrollo.

Tabla 4.13 Resumen de los indicadores para la obtención de la Importancia Acumulada Predicha

Hitos del Proyecto	Indicadores	
	Importancia del Impacto	Importancia Acumulada
Hito 1	Severa	Crítica
Hito 2	Crítica	

4.4.3 Selección de las medidas correctoras

En la etapa de operación se producen sobre el medio ambiente los siguientes impactos clasificados como negativos:

- Aumento de los niveles de polvo sedimentable en el aire
- Contaminación sónica
- Incremento de los niveles de contaminación por los gases de escape de los motores de combustión interna
- Aumento del riesgo de enfermedades y molestias por la acción del polvo
- Deterioro de la calidad del paisaje
- Migración de especies animales
- Aumento de la insolación y la temperatura

- Cambio en la composición físico-química de las aguas de escurrimiento superficial
- Destrucción de la red de drenaje superficial y subterránea
- Modificación del nivel piezométrico de las aguas
- Cambio en la propiedades físico-químicas de los suelos
- Incremento de la intensidad de los procesos erosivos

A partir de los resultados obtenidos en las etapas anteriores se concluye que es necesario aplicar medidas correctoras que mejoren la calidad ambiental sin esperar que comience la etapa Abandono del proyecto.

Para el procesamiento de las medidas correctoras son necesarios los siguientes datos: Importancia Media del impacto recibido, Importancia Media deseada, y el efecto que puede ser modificado.

El proceso de análisis de las medidas correctoras tiene dos etapas: en la primera etapa se realiza el análisis de las medidas correctoras suponiendo que pueden ser modificados todos los impactos ambientales, lo que añade medidas protectoras al proyecto; en la segunda etapa se analiza la inclusión de nuevas acciones al proyecto, en esta etapa se añaden las medidas de mitigación.

Se desea que el impacto ambiental para la etapa de Operación sea Moderado, los expertos plantean que lograr este valor es significativo puesto que las acciones que se ejecutan en esta etapa son altamente impactantes para el Medio Ambiente.

A continuación se muestra el proceso de selección de medidas correctoras seguido. El proceso se realizará utilizando el indicador Importancia predicha obtenido en la evaluación en el tiempo para el Hito 1 del proyecto.

Importancia Media

- Muy posiblemente (1.00) Crítica
- Muy posiblemente (1.00) Severa
- Poco posiblemente (0.20) Moderada

Importancia Media deseada

- Posiblemente (0.51) Severa

- Muy posiblemente (1.00) Moderada
- Posiblemente (0.51) Irrelevante

Efecto Modificable

El efecto modificable en este caso es el de la actividad Operación sobre el Medio Ambiente cuya valoración es:

- Muy posiblemente (1.00) Crítica
- Muy posiblemente (1.00) Severa
- Poco posiblemente (0.20) Moderada

Después de estimar las medidas correctoras, se obtuvo que la importancia que debería tener el efecto es:

- Posiblemente (0.51) Severa
- Muy posiblemente (1.00) Moderada
- Posiblemente (0.51) Irrelevante

Lo que trae como consecuencia que mejore el indicador de importancia para el Hito 1 obteniéndose el valor deseado. Para lograr la mejoría del indicador se sugiere que se apliquen, entre otras, las siguientes medidas de protección:

- No afectar las franjas de protección de ríos, arroyos u otras zonas no planificadas en el proyecto
- Cumplir con las medidas de seguridad personal e industrial.
- Cumplir con los niveles permitidos de descarga de sólidos en las aguas
- Realización de conferencias al personal sobre las afectaciones que provoca esta fase sobre el medio y cuáles serían las acciones a tomar en el desempeño del trabajo para minimizar los daños
- Limitar el trabajo de las unidades ruidosas a horas diurnas
- Reducción de la velocidad de los vehículos
- Elaboración del plan de manejo del yacimiento teniendo en cuenta la legislación vigente

Con la utilización de estas medidas, debe mejorar la calidad ambiental de los factores ambientales: Agua, Aire y Población.

En la segunda etapa del análisis de las medidas correctoras se incluyó una acción genérica “Medidas Correctoras” cuyo impacto se supone reduzca el impacto ambiental del Hito 1 hasta lograr el valor deseado. El valor de la acción genérica “Medidas Correctoras” debe ser al menos Moderado Positivo. Se proponen las siguientes medidas de mitigación:

- Acondicionamiento de los drenajes
- Creación de pantallas vegetales
- Estabilización de la superficie
- Colocar durante la perforación filtros de manga, que permitan la captación directa del polvo.
- Cubrir las superficies desnudas con cobertura herbácea para disminuir la erosión eólica
- Mantener un riego sistemático de agua en los caminos
- Instalación de silenciadores en los equipos móviles
- Construir balsas de decantación
- Utilización de tecnología apropiada para la explotación

Estos nuevos datos sirven a los expertos ambientales para tomar la decisión final, sobre si puede modificarse o no el impacto del proyecto hasta obtener la importancia del impacto deseada. También corresponde a los expertos ambientales determinar si es técnica y económicamente posible realizar las correcciones propuestas.

Una vez revisadas las propuestas los expertos valoran el Efecto Ambiental de las Medidas Correctoras para el primer hito. A continuación se muestran los valores asignados a la importancia y a la magnitud, en las tablas 4.14 y 4.15 se muestra la valoración de las variables y de los indicadores ambientales utilizados. Nótese que los expertos ambientales solo evalúan los indicadores relacionados con las medidas correctoras que aplicarán.

La importancia del impacto de las medidas correctoras se valora como Moderado Positivo, siendo la valoración detallada:

- Posiblemente (0.44) Irrelevante

- Muy posiblemente (1.00) Moderado Positivo
- Posiblemente (0.38) Severo Positivo

La magnitud de las medidas correctoras se valora como Aceptable, siendo la valoración detallada:

- Muy posiblemente (0.80) Baja
- Muy posiblemente (1.00) Media o Aceptable

Tabla 4.14 Valoración lingüística de las medidas correctoras

Variable	Valoración
Naturaleza del Impacto	Positiva
Intensidad	Alta
Extensión	Extenso
Sinergia	Sinérgico
Efecto	Directo
Recuperabilidad	Mitigable a corto plazo

Tabla 4.15 Valoración de los Indicadores Ambientales

Indicador Ambiental	Valoración del Indicador	Valoración de la Magnitud
Superficie erosionada	Media	Aceptable
Material Particulado (concentración media en 24 horas)	Moderada	Baja
Concentración de Monóxido de Carbono (CO)	Moderado	Baja
Nivel de ruido	Moderado	Aceptable
Turbidez	Moderada	Aceptable
Red de drenaje afectada	Moderada	Aceptable
Calidad del Paisaje	Bueno	Aceptable

Con los resultados anteriores se calcula el efecto de las medidas correctoras. El cual se estima Moderado, con la valoración detallada siguiente:

- Posiblemente (0.62) Aceptable
- Muy posiblemente (1.00) Moderado

Lo anterior significa que la aplicación de las medidas correctoras puede mejorar notablemente el medio ambiente.

Tabla 4.16 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto de las Medidas Correctoras

Hitos del Proyecto	Indicadores		
	Importancia del Impacto	Magnitud del Impacto	Efecto Ambiental
Hito 1	Moderado Positivo	Aceptable	Moderado
Hito 2	Moderado Positivo	Aceptable	Moderado

4.4.4 Evaluación de la evolución en el tiempo del impacto ambiental

En esta etapa de la metodología cuando se realiza el seguimiento en el tiempo de los impactos ambientales. La cual permite evaluar si el impacto ambiental esta dentro del umbral de aceptación establecido y si las medidas correctoras que se están aplicando son realmente efectivas.

En el presente apartado se realiza la evaluación para el primer hito del proyecto tomado como caso de estudio.

Diagnóstico Ambiental para el Hito 1

El diagnóstico ambiental comienza con la valoración aproximada del impacto que está recibiendo el medio ambiente en el momento del hito. Para ello se realiza la valoración lingüística de las variables seleccionadas para estimar la importancia del impacto en un momento determinado. En la tabla 4.17 se muestra la valoración realizada por los expertos ambientales.

Tabla 4.17 Valoración lingüística del impacto provocado

Variable	Valoración
Naturaleza del Impacto	Negativa
Intensidad	Alta
Extensión	Extenso
Sinergia	Sinérgico
Efecto	Directo
Acumulación	Baja

Se obtuvo que la importancia del impacto en el primer hito del proyecto resulta Irrelevante, siendo su valoración detallada:

- Posiblemente (0.44) Moderado
- Muy posiblemente (1.0) Irrelevante

Seguidamente los expertos ambientales procedieron a hacer las mediciones y observaciones necesarias para calcular la magnitud ambiental. En la tabla 4.18 se muestran los indicadores y su valor. Como resultado se obtiene que la magnitud del impacto ambiental en le primer hito del proyecto es Aceptable, siendo su valoración detallada:

- Posiblemente (0.61) Baja
- Muy posiblemente (1.00) Aceptable
- Muy posiblemente (1.00) Alta

Tabla 4.18 Valoración de los Indicadores Ambientales

Indicador Ambiental	Valoración del Indicador	Valoración de la Magnitud
Superficie erosionada	Fuerte	Alta
Material Particulado (concentración media en 24 horas)	Elevada	Alta
Concentración de Monóxido de Carbono (CO)	Notable	Aceptable
Nivel de ruido	Muy Alto	Muy Alta
Espesor de la capa fértil	Muy Baja	Muy Alta
Nivel de humedad (del suelo)	Bajo	Alta
Nivel de compactación (del suelo)	Severo	Alta
Turbidez	Alta	Alta
Red de drenaje afectada	Moderada	Aceptable
Temperatura	Moderada	Aceptable
Cantidad de árboles observable	Muy escasos	Muy Alta
Calidad del Paisaje	Mediocre	Alta
Diversidad de especies	Nula	Muy Alta
Uso del suelo	Bajo	Alta
Nivel de empleo	Alto	Alta
Nivel de inversiones	Notable	Aceptable
Valor del suelo (suelo afectado revalorizable)	Alto	Alta

Finalmente se obtiene que el efecto calculado para el primer hito es Moderado, cuya valoración ampliada es:

- Muy posiblemente (1.00) Moderado
- Poco posiblemente (0.07) Severo

Con estos resultados se demuestra que las medidas correctoras seleccionadas resultaron efectivas.

Tabla 4.19 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto Calculado para el Hito 1

Hitos del Proyecto	Indicadores		
	Importancia del Impacto	Magnitud del Impacto	Efecto Ambiental
Hito 1	Irrelevante	Aceptable	Moderado

4.4.5 Resumen de los resultados obtenidos en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental

La aplicación de la metodología difusa de evaluación en el tiempo del impacto ambiental en el Yacimiento Punta Gorda arrojó los siguientes resultados:

1. La predicción del efecto ambiental y de sus indicadores asociados, importancia y magnitud del impacto, para los Hitos 1 y 2 del proyecto evidenció que el deterioro de las condiciones ambientales durante esta etapa crece progresivamente. Para el primer hito del proyecto se estimó la importancia del impacto Severa y para el hito siguiente Crítica.
2. A partir de la valoración del efecto predicho se concluyó la necesidad de aplicar medidas correctoras para minimizar los efectos de los impactos ambientales que produciría el proyecto durante en la etapa de Operación. Fueron seleccionadas medidas protectoras y de mitigación para su aplicación durante la etapa. La valoración de los indicadores importancia, magnitud y efecto ambiental permitió predecir la efectividad esperada de la aplicación de estas medidas correctoras. Por ejemplo, para el Hito 1 del proyecto se predijo que las medidas correctoras provocarían un impacto Moderado Positivo en el entorno, lo que traería como consecuencia que el valor del efecto total esté entre Moderado y Severo.
3. El diagnóstico ambiental realizado en el Hito1 del proyecto permitió conocer el estado del medio ambiente en ese momento específico; y realizar comparaciones

entre los valores predichos y los estimados en ese momento. Se obtuvo que en el Hito 1 el efecto ambiental total sería Moderado, siendo la interpretación ampliada la siguiente:

- Muy posiblemente (1.0) Moderado
 - Poco posiblemente (0.17) Severo
4. Se concluye, a partir de los valores del efecto ambiental predicho, de las medidas correctoras y calculado, para el Hito 1 del proyecto que se logró una selección adecuada de medidas correctoras para la mitigación de los impactos ambientales que se producen en el periodo de tiempo que se evaluó.

En la tabla 4.20 se muestra un resumen de los indicadores calculados en el proceso para la obtención del Efecto Ambiental.

Tabla 4.20 Resumen de los indicadores para la obtención del Efecto Total

Hitos del Proyecto		Indicadores			
		Importancia del Impacto	Magnitud del Impacto	Efecto Ambiental	Efecto Total
Hito 1	Predicho	Severo	Alta	Severo	Moderado-Severo ¹
	Medidas Correctoras	Moderado Positivo	Aceptable	Moderado	
	Calculado	Irrelevante	Aceptable	Moderado	Moderado ²
Hito 2	Predicho	Crítico	Alta	Severo	Moderado-Severo ¹
	Medidas Correctoras	Moderado Positivo	Aceptable	Moderado	

1. Efecto Total obtenido en la predicción (agregación del efecto predicho y el efecto de las medidas correctoras)
2. Efecto Total ajustado después del diagnóstico ambiental

En cuanto a la Importancia Acumulada, su estimación en la metodología que se propone, tiene tres etapas fundamentales:

- Predicción inicial, en la cual se predice el valor que tendrá la importancia del impacto.
- Predicción con la inclusión de las medidas correctoras, en este momento se incluye en la predicción los posibles valores de los efectos de las medidas correctoras que se aplicarán.

- Ajuste después del diagnóstico ambiental, una vez valorado el efecto calculado del proyecto en determinado hito se ajustan los valores de Importancia acumulada para hitos posteriores.

Para el proyecto Yacimiento Punta Gorda se comprueba que:

1. Tras la predicción de la importancia del impacto para los dos primeros hitos del proyecto se estima que el impacto global sea Crítico.
2. Tras la selección y valoración de los efectos que tendrán las medidas correctoras se estima que el impacto global será Moderado.
3. Una vez realizada la valoración en el Hito 1, se realiza un ajuste a los valores del impacto global, en el cual se obtuvo que: el impacto global, tras el Hito 2 del proyecto se estima entre Moderado e Irrelevante si las medidas correctoras continúan teniendo la efectividad mostrada hasta el momento del Hito 1; en otro caso el impacto global será Severo.

En la tabla 4.21 se muestra un resumen de estos resultados.

Tabla 4.21 Resumen de los indicadores para la obtención de la Importancia del Impacto Global

Hitos del Proyecto	Importancia del Impacto		
	Predicha	Predicha con la inclusión de las Medidas Correctoras	Ajustada después del Diagnóstico Ambiental (Importancia Calculada)
Hito 1	Severo	Moderado-Irrelevante	Irrelevante
Hito 2	Crítico	Moderado	-
<i>Importancia Acumulada</i>	<i>Crítico</i>	<i>Moderado</i>	<i>Severo-Moderado-Irrelevante</i>

La aplicación de la metodología mostrada en esta sección permitió:

1. Predecir los valores de la importancia del impacto ambiental, magnitud del impacto ambiental en momentos específicos del desarrollo del proyecto.
2. Conocer el estado de medio ambiente en momentos precisos de la ejecución del proyecto e identificar las variaciones que se produjeron en el entorno.
3. Comprobar la efectividad de las medidas correctoras aplicadas durante el proyecto.

Conclusiones
y
Trabajos Futuros

En la presente memoria se describió una metodología difusa de evaluación de impacto ambiental que permite realizar el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental, y su aplicación a un caso de estudio el Proyecto Minero Yacimiento Punta Gorda (Moa, Cuba).

La incorporación de técnicas difusas en la evaluación de impacto ambiental de proyectos mineros permite, definir de manera adecuada conceptos vagos como impacto moderado o impacto severo, representar la incertidumbre inherente a las predicciones que se realizan. La utilización de una estructura jerárquica permite que se puedan estudiar los impactos con distintos niveles de detalle, y brinda mecanismos para la caracterización de las medidas correctoras tan necesarias en este tipo de proyectos.

Se ha presentado un primer estudio de EIA con técnicas difusas adaptado a la minería, y particularizada para el Yacimiento Punta Gorda de Moa. Este estudio facilitó la representación de la subjetividad de las predicciones y que esta fuera manipulada de manera coherente. Permitió además, un acercamiento más directo a los problemas ambientales que sufre la región, y sirvió como punto de partida para la identificación de los elementos relevantes para la EIA de proyectos mineros. La utilización de esta metodología favoreció que ciertas dificultades que afrontaban los expertos ambientales en la toma de decisiones disminuyeran, pues ahora pueden tomar en consideración nuevas soluciones para un mismo problema. Finalmente, se brindan resultados más comprensibles para los decisores.

Los impactos ambientales negativos producidos por la minería son usualmente de

carácter permanente, pues las acciones que los producen duran largos periodos de tiempo. A partir de la necesidad de efectuar predicciones más precisas que permitan tomar la decisión adecuada en momentos específicos de la ejecución del proyecto, se presentó un modelo para la evaluación de impacto ambiental en el tiempo y se definió una metodología para el seguimiento de las variaciones en el tiempo del impacto ambiental. Este modelo, basado en la identificación de momentos relevantes del tiempo de vida del proyecto (hitos del proyecto), permite predecir y evaluar las variaciones que se produzcan en el entorno del proyecto durante su ejecución.

Este modelo, que es una extensión del modelo difuso de evaluación de impacto ambiental, se propone para proyectos de larga duración, para los cuales la ambigüedad que se introduce durante la predicción es elevada, y a veces resulta difícil a los expertos ambientales predecir qué estará ocurriendo en 10 años, por ejemplo.

Para la estimación de la variación de los impactos ambientales durante el transcurso de la ejecución del proyecto se calcula una estimación del *Efecto Ambiental Total* para cada hito. Como método de cómputo del Efecto Ambiental Total se realiza la agregación de los efectos ambientales predicho, de las medidas correctoras y calculado. Puesto que representan momentos diferentes durante la ejecución del proyecto: situación prevista en momentos anteriores al hito, la previsión del efecto que tendrán las medidas correctoras seleccionadas para minimizar el efecto ambiental previsto y finalmente el efecto ambiental real que se produce en el entorno llegado el momento representado por el hito. Es importante señalar que una vez obtenido el Efecto Total para un hito determinado la estimación del impacto para hitos posteriores puede ajustarse a partir del impacto real que está produciendo el proyecto sobre el Medio Ambiente.

Se introdujo, además, el indicador *Importancia Acumulada* que permite obtener una valoración global de la importancia del proyecto. El cálculo de la Importancia Acumulada se inicia con la estimación de la variación en el tiempo del impacto ambiental (función $via(t)$) realizada por los expertos ambientales. La función $via(t)$ tiene como complemento una función que define la variación de la ambigüedad de las predicciones ($\delta(t)$), con estas curvas se construye un número difuso que representa la valoración del cambio en el tiempo del impacto ambiental.

Para facilitar esta estimación se propone un método tabular para definir la función $via(t)$. Este método permite además que los expertos definan la periodicidad de las

estimaciones, es decir, la definición de los hitos del proyecto. De manera análoga a la estimación del Efecto Ambiental Total, se proponen tres momentos para el cálculo de la Importancia Acumulada: predicha, de las medidas correctoras y calculada.

La concreción del modelo para la evaluación en el tiempo del impacto ambiental es la Metodología para el Seguimiento en el Tiempo del Impacto Ambiental, la cual permite:

- identificar las variaciones que se produzcan en el entorno del emplazamiento del proyecto,
- conocer el estado del medio ambiente en momentos dados de la ejecución del proyecto,
- comprobar la efectividad de las medidas correctoras aplicadas, y de esa manera valorar la necesidad de incluir cambios al proyecto.

Para facilitar el uso (a los expertos ambientales del territorio) de la metodología desarrollada, se presentó el sistema informático *SIAM* (Sistema para la evaluación de Impacto Ambiental), que la implementa, en su versión para proyectos de minería. *SIAM* sugiere de manera automática los factores ambientales afectados y los impactos que provocarán las acciones que se realizarán en el proyecto. Facilita la obtención de diferentes índices de la EIA (Importancia del Impacto, Importancia Media, Magnitud del Impacto,.....) y permite la visualización de los resultados en diferentes formatos y niveles de detalle. Incorpora métodos para la caracterización de las medidas correctoras y recomienda cuales aplicar a partir de los impactos ambientales identificados.

De manera general, se puede afirmar que *SIAM* permite realizar una evaluación integral de impacto ambiental de proyectos mineros a través de la implementación de la metodología para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental, desde las primeras etapas del proyecto hasta la etapa de Abandono y Cierre de la mina.

Finalmente se ejemplificó la utilización de la metodología a un caso de estudio, utilizando *SIAM* como herramienta para facilitar el procesamiento de la información. La utilización de esta metodología en la evaluación periódica de los impactos que provoca el proyecto Yacimiento Punta Gorda, permitió la inclusión de acciones de mitigación de los impactos ambientales desde la etapa de Operación, que con otras metodologías no eran implementadas hasta la etapa de Abandono. Además el diagnóstico realizado en el Hito 1 del proyecto permitió corroborar la efectividad de estas medidas de mitigación.

Al decir de los expertos ambientales consultados, tras la revisión de la metodología que aquí se presenta y los resultados obtenidos tras su aplicación a un caso de estudio, se brinda una nueva visión acerca del proceso de evaluación de impacto ambiental. No solo se obtienen resultados más flexibles, sino que también se eliminan algunas dificultades que se afrontaban en la toma de decisiones, y además que resulta de singular ayuda la estrategia para la evaluación y selección de las medidas correctoras.

Aunque en esta memoria, la metodología para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental y *SIAM* se presentan para el dominio específico de las evaluaciones de impacto ambiental de proyectos mineros, por las características de su diseño puede ser fácilmente extendido a otros dominios a partir de la extensión de la base de conocimiento.

Teniendo en cuenta las mejoras que ofrece la metodología para el seguimiento en el tiempo del impacto ambiental y el sistema informático presentados en esta memoria a la EIA, se propone continuar las investigaciones en la temática en diversas direcciones, como las que se enuncian en el apartado siguiente.

TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar otros métodos para la estimación de la Importancia del Impacto, explorar las relaciones existentes entre la magnitud y la importancia del impacto, que puede ser estudiado de manera indirecta también a través de la relación entre la importancia del impacto y la calidad ambiental.
- Ampliar el conjunto de reglas de decisión acerca de la necesidad de aplicación de medidas correctoras, incluyendo en la toma de decisiones otras de las variables utilizadas para la estimación de la importancia del impacto.
- Realizar estudios de bases de datos medioambientales que permitan obtener regularidades en el comportamiento de los descriptores ambientales, de manera tal que se enriquezca la *Base de Conocimiento* del sistema *SIAM* y la predicción de las variaciones en el tiempo del impacto ambiental resulte más efectiva.
- Incluir al sistema *SIAM* los módulos de explicación y de adquisición del conocimiento. El primero de ellos para brindar explicaciones detalladas de las acciones que realiza el sistema y las conclusiones y resultados que presenta, y el

segundo para permitir a los expertos ambientales incluir nuevo conocimiento a la *Base de Conocimiento*, o modificar el existente.

- Integrar los software TDEIA y SIAM para la obtención de un sistema generalizado de Evaluación de Impacto Ambiental

PUBLICACIONES

- Duarte, O.G.; Requena, I.; Rosario, Y. Fuzzy Techniques for Environmental-Impact Assessment in the Mineral Deposit of Punta Gorda (Moa, Cuba). *Environmental Technology*, 28 (2007) 659-670.

Bibliografía

- [1] Minería y Medio Ambiente. [Consultado el 26 de febrero de 2006]. Disponible en:
<http://www.uclm.es/users/higueras/mam/InicioMAM.htm>.
- [2] Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. [Consultado el 23 de mayo de 2006].
Disponible en:
<http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html>.
- [3] Protégé User's Guide. Disponible en: <http://protege.stanford.edu>.
- [4] Seminario "Explotación Minera y Medio Ambiente", Ministerio de Minería de Chile-Unión Geóloga Minera de Cuba, La Habana, 23 al 26 de Septiembre de 1996.
- [5] CLIPS Reference Manual. Volume I: Basic Programming Guide. 2006. Disponible en: <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>.
- [6] Agencia de Medio Ambiente. Reglamento para la Realización y Aprobación de Evaluaciones de Impacto Ambiental. Resolución 77/99, La Habana.
- [7] Aguiló Alonso, M.;Aramburu, M.P.;Cifuentes, P. *et al.* Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 1998.
- [8] Álvarez, C.; Sierra, V. Metodología de la Investigación Científica. Centro Manuel F. Gran, Santiago de Cuba, 1995.
- [9] Ayala Carcedo, F.J. Evaluación y Corrección de Impactos Ambientales. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1992.

- [10] B.M. Álvarez Arena *et al.* Sistema Español de Indicadores Ambientales: subáreas de biodiversidad y bosques. Ministerio del medio ambiente: Dirección general de calidad y evaluación ambiental, Madrid, 1996.
- [11] Boose, J.H. A survey of knowledge acquisition techniques and tools. *Knowledge Acquisition*, 1 (1989) 3-37.
- [12] Brachman, R.J.; Levesque, H.J. (Eds.). Readings in Knowledge Representation. Morgan Kaufmann, Los Altos, California, 1985.
- [13] Canter, L. Manual de Impacto Ambiental (2da Edición). Mc Graw-Hill, Madrid, 1998.
- [14] Canter, L.; Sadler, B. A tool kit for effective environmental impact assessment practice review of methods and perspectives on their application. A supplementary report of international study of the effectiveness of environmental assessment. International Association for Impact Assessment (IAIA), 1997.
- [15] CEPRONIQUEL. Estudio Línea Base del Yacimiento Punta Gorda Departamento Técnico Subdirección Mina Cdte. Ernesto Che Guevara, Moa (Cuba), 1998.
- [16] CITMA. Estrategia Ambiental de la Republica de Cuba, La Habana, 1997.
- [17] CITMA. Sistema de Gestión Empresarial del CITMA, 2001.
- [18] Conesa Fernández, V. Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental (2da Edición). Editorial Mundi-Prensa, Madrid, 1997.
- [19] Delgado, M.; Duarte, O.; Requena, I. A fuzzy methodology for the environmental impact evaluation of garbage dumps. ISFA-2005 World Congress Beijing, 2005.
- [20] Driankov D.; Hellendoorn, H.; Reinfrank, M. An Introduction to Fuzzy Control. Springer-Verlag, 1993.
- [21] Duarte, O.G. Técnicas Difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental. Tesis Doctoral Universidad de Granada. 2000.
- [22] Duarte, O.G.; Delgado, M.; Requena, I. Algorithms to extend crisp functions and their inverse functions to fuzzy numbers. *International Journal of Intelligent Systems*, 18 (2003) 855-876.
- [23] Duarte, O.G.; Requena, I.; Rosario, Y. Fuzzy Techniques for Environmental-Impact Assessment in the Mineral Deposit of Punta Gorda (Moa, Cuba). *Environmental Technology*, 28 (2007) 659-670.
- [24] Dubois, D.; Prade, H. Operation on fuzzy numbers. *Int. J. Systems Sci* (1978) 613-626.

-
- [25] Dubois, D.; Prade, H. Fuzzy real algebra: some results. *Fuzzy Sets and Systems* (1979) 327-348.
- [26] Dubois, D.; Prade, H. Fuzzy sets and fuzzy systems: theory and application. Academic Press Inc, 1980.
- [27] Dubois, D.; Prade, H. Additions of interactive fuzzy numbers. *IEEE Automat. Control* (1981) 926-936.
- [28] Eckel, B. Thinking in Java (3ra Edición). Prentice Hall PTR, New Jersey, 2003.
- [29] Environment Department, Indicators of Pollution Management, Pollution Prevention and Abatement Handbook, The World Bank, Washington DC, 1997.
- [30] Environment Department, Environmental Assessment of Mining Project, Environmental Assessment Sourcebook, The World Bank, Washington DC, 1997.
- [31] Environment Department, Nickel Smelting and Refining, Industrial Pollution Prevention and Abatement Handbook, The World Bank, Washington DC, 1997.
- [32] Espinoza, G. Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo-Centro de Estudios del Desarrollo, Santiago de Chile, 2001.
- [33] Estudios y Proyectos Mineros S.A. Manual de restauración de terrenos y de evaluación de impactos ambientales en la minería. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1996.
- [34] Fernández Fernández, G. Representación del Conocimiento en Sistemas Inteligentes. Universidad Politécnica de Madrid, 2004. [Consultado el 21 de junio de 2006]. Disponible en: <http://www.gsi.dit.upm.es/~gfer/ssii/>.
- [35] Ferraro, D.O.; Ghera, C.M.; Sznajd G.A. Evaluation of environmental impact indicator using fuzzy logic to assess the mixed cropping in the inland Pampa, Argentina. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 96 (2003).
- [36] Fischer D.W., Davis G.S. An approach to assessing environmental impacts. *Journal of Environmental Management*, 1 (1973). 207-227.
- [37] Fortlage, C.A. Environmental assessment: a practical guide. Gower, Aldershot, 1990.
- [38] Franceschini, F.; Galetto, M.; Maisano, D. A short survey on air quality indicators: properties, use and (mis)use. *Management of Environmental Quality: an International Journal*, 16 (2005). 490-504.
-

- [39] Gálvez Lio, D. Notas del Curso Sistemas Basados en el Conocimiento, Dpto. Ciencias de la Computación. UCLV, 1998.
- [40] García Leyton, L.A. Aplicación del Análisis Multicriterio en la Evaluación de Impactos Ambientales. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Catalunya. 2004.
- [41] Ghomshei, M.M.; Meech, J.A. Application of Fuzzy Logic in Environmental Risk Assessment: some thought on fuzzy sets. *Cybernetics and Systems: an International Journal*, 31 (2000) 317-332.
- [42] Gobierno de Cuba. Ley 76 "Ley de Minas", Gaceta Oficial de la República de Cuba, 1995.
- [43] Gobierno de Cuba. Ley 81 "Del Medio Ambiente", Gaceta Oficial de la República de Cuba, La Habana, 1997.
- [44] Godet, M. Manuel de Prospective Stratégique: L'art et la methode. Dunot, Paris, 1997.
- [45] Gómez Orea, D. Evaluación de Impacto Ambiental (3ra Edición). Editorial Agrícola Española, 1998.
- [46] Hernández, T. Evaluación de Impacto Ambiental en el Yacimiento Punta Gorda. Tesis de Maestría Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2000.
- [47] Herson, A.; Bogdan, K. Mitigating Environmental Impacts: Law, Policy and Practice. UC David Extension, 1996.
- [48] Hill, M.; Shechter, M. Optimal Goal Achievement in the Development of Outdoor Recreation Facilities. In A.G. Wilson, ed., *Urban and Regional Planning*. London: Pion, 1971. 110–121
- [49] Holmes, J.C. An ordinal method of evaluation. *Urban Studies* 9 (1972). 179–191
- [50] Holzner, S. Eclipse. O'Reilly, 2004.
- [51] Kaufmann, A.; Gupta, M.M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Application. Von Nostrand, New York, 1985.
- [52] Klir, G.; Yuan, B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [53] L.B. Leopold *et al.* A procedure for evaluating environmental impacts, US Geological Survey Circular 645/1971, Washington D.C., 1971.
- [54] Landeta, J. El Método Delphy. Ariel, Barcelona, 1999.
- [55] Linstone, H.A.; Turrof, M. (Eds.). The Delphy Method: Techniques and Applications. Addison Wesley Publishing, 1975.

-
- [56] López de Mantarás, R. *Aproximate Reasoning Models*. Ellis Harwood, Chichester, England, 1990.
- [57] Mark, S. *Introduction to Knowledge Systems*. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1995.
- [58] Milton, N.R. *Knowledge Acquisition in Practice: a step by step guide*. Springer Verlag London, 2007.
- [59] MOPU. *Guías Metodológicas para la Elaboración de Estudios de Impactos Ambientales* Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2000.
- [60] Muñoz Pedrero, A. La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77 (2004) 139-156.
- [61] NC 19-01-04:80. Ruido. Requisitos generales, higiénicos y sanitarios, Normas Cubanas.
- [62] NC 22:99. Lugares de baño en costas y aguas interiores. Requisitos higienico-sanitarios.
- [63] NC 39:99. Calidad del Aire: Requisitos Higiénico-Sanitarios.
- [64] NC 93-01-103:87. SNPMA. Hidrosfera. Clasificación de la utilización de las aguas interiores.
- [65] NC 93-01-210:90. HIDROSFERA: Protección de aguas superficiales y subterráneas.
- [66] NC 93-03-104. SNPMA. Suelos. Términos y Definiciones.
- [67] NC 111:04. Calidad del Aire: Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos.
- [68] NC-ISO 14004:98. Sistemas de Gestión Ambiental. Directrices y Sistemas de Apoyo
- [69] NC-ISO 14011:98. Directrices para auditorías ambientales. Procedimientos de auditorías. Auditorías de Sistemas de Gestión Ambiental.
- [70] Norbert Dee *et al.* *Environmental evaluating system for water resource planning*, Battelle-Columbus Laboratories, USA, 1972.
- [71] Odum, Howard T. Use of Energy Diagrams for Environmental Impact Statements. In *Proceedings of the Conference Tools for Coastal Management*. Marine Technology Society Washington, D.C. 1972. 197-213.
- [72] Oñate Martínez, N.; Ramos Morales, L.; Díaz Armesto, A. Utilización del método Delphy en la pronosticación: una experiencia inicial. Instituto de Investigaciones Económicas de la Junta Central de Planificación, La Habana, 1990.
-

-
- [73] Ott, L.; Longnetter, M.T.; Ott, R.L. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis* (5ta Ed). Brooks-Cole Publ., USA, 2000.
- [74] Rich, E.; Knight, K. *Artificial Intelligence* (2da Edición). McGraw Hill, New York, 1991.
- [75] Rodríguez Pacheco, R.; Candela, L. Contaminación de las aguas subterráneas (Moa, Holguín, Cuba). *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia, 1998
- [76] Rosario, Y. Evaluación de Impacto Ambiental Difusa en la Minería de Moa (Cuba), Trabajo de DEA, Instituto Superior Minero Metalúrgico-Universidad de Granada 2006.
- [77] Russell, S.J.; Norving, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [78] Sánchez Muñoz, D. Metodología Jerárquico-Matricial para la Evaluación de Impacto Ambiental. Tesis Doctoral Universidad de Granada. 2008.
- [79] Sexto, L. F. Ruido, Normativa y Legislación en Cuba, Centro de Estudios de Innovación y Mantenimiento (CEIM-CUJAE), 2004.
- [80] Silvert, W. Ecological Impact classification with fuzzy sets. *Ecological Modelling*, 96 (1997).
- [81] Urichio, V.F.; Giordano, R.; López, N. A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation. *Journal of environmental management*, 73 (2004).
- [82] USDA. Environmental Pollution Prevention, Control and Abatement Manual, Washington DC, 2004.
- [83] USEPA. Water Quality Standard Handbook, Washington DC, 1994.
- [84] USEPA. Proposed Indicator for 2007 Report on Environment, Washington DC, 2006.
- [85] Vanderverf, H.M.G.; Zimmer, C. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere*, 36 (1997).
- [86] Walker, L.J.; Johnston, J. Guideline for the Assessment of Indirect and Cumulative Impacts as well as Impact Interactions, EC DG XI, 1999.
- [87] Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Information and control*, 8 (1965) 338-353.
- [88] Zadeh, L.A. The concept of linguistic variable and its applications to approximate reasoning (Part I). *Inform. Sci* (1975) 199-249.
-

- [89] Zadeh, L.A. The concept of linguistic variable and its applications to approximate reasoning (Part II). *Inform. Sci* (1976) 301-357.
- [90] Zadeh, L.A. The concept of linguistic variable and its applications to approximate reasoning (Part III). *Inform. Sci* (1976) 43-80.
- [91] Zadeh, L.A. What is computing with words? *Computing with words in Information/Intelligent Systems 1*. Physica Verlag, 1999

Anexos

Anexo I PROCESAMIENTO DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS A LOS EXPERTOS AMBIENTALES

Con la realización de entrevistas y encuestas a expertos ambientales de Moa se pretendía una aproximación descriptiva a los métodos, tareas e información involucrados en las evaluaciones de impacto ambiental. Fueron consultados 7 expertos de distintas áreas de conocimiento dedicados a las evaluaciones de impacto ambiental.

Encuesta: Variables para el Cálculo de la Importancia de los Impactos. Métodos para el Cálculo de la Importancia de los Impactos

Cuestionario: Variables para el cálculo de la importancia

1. ¿Qué variables tiene UD. en cuenta para la valoración de la importancia de los impactos ambientales? Evalúe la importancia que le concede a cada una de las variables seleccionadas, valores del 0 al 10.

Variable	Valoración
Naturaleza del Impacto	
Extensión	
Intensidad	
Momento	
Persistencia	
Recuperabilidad	
Efecto	
Periodicidad	
Reversibilidad	
Sinergia	
Acumulación	

- a) Proponga si deben considerarse otras variables

Variable	Valoración

Otras consideraciones:

Cuestionario: Métodos para el cálculo de la importancia de los impactos ambientales

1. ¿Qué métodos utiliza para el cálculo de la importancia de los impactos?

1.1 Suma de las variables

1.2 Suma ponderada de las variables

2. ¿Qué métodos utiliza para el cálculo de las importancias globales?

2.1 Suma de las importancias

2.2 Suma ponderada de las importancias

2.3 Media de las importancias

2.4 Valores máximo (o mínimo) de las importancias

Otras consideraciones:

Análisis de los resultados

Variables	Expertos							Peso
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	
Naturaleza del Impacto	3	5	5	10	5	5	5	5
Extensión	9	7	10	10	7	9	9	8.8
Intensidad	8	10	10	10	9	8	7	9
Momento	7	7	6	10	7	6	5	6.6
Persistencia	3	5	5	10	10	6	5	6.2
Recuperabilidad	7	6	8	10	7	5	4	6.6
Efecto	3	5	4	10	3	6	2	4.2
Periodicidad	5	5	6	10	5	5	5	5.2
Reversibilidad	5	5	7	10	7	5	4	5.8
Sinergia	5	5	7	10	5	5	8	6
Acumulación	6	5	7	10	7	9	6	7

Métodos	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Selección
1.1	1	1	1	0	1	0	1	5
1.2	1	1	1	1	1	1	1	7
2.1	1	0	0	1	0	1	0	3
2.2	1	1	1	1	1	1	1	7
2.3	1	1	1	1	1	1	1	7
2.4	1	0	0	1	0	1	0	3

Sea R_{ij} la valoración dada por el experto i a la variable j , $Peso_j = \frac{\sum_{i=1}^n R_{ij}}{n} - \max\{R_{ij}\} - \min\{R_{ij}\}$

(n , número de expertos). Se seleccionaron como métodos válidos los que fueron seleccionados por más de cuatro expertos.

Las variables que los expertos consideran más importantes son la Intensidad y la Extensión, luego la Acumulación, el Momento y la Recuperabilidad, por lo que no deben ser obviadas en las valoraciones de los impactos ambientales.

Además, los expertos señalaron en sus respuestas su consideración de tener en cuenta algunos parámetros o variables generales tales como: uso del agua, importancia del emplazamiento (área protegida, patrimonio cultural, etc.), si se afectan o no especies endémicas, entre otros.

En cuanto a los métodos utilizados para el cálculo de la importancia, los más utilizados: para el cálculo de la importancia de los impactos, la suma ponderada de las variables (todos lo utilizan) y para el cálculo de las importancias globales, suma ponderada de las importancias y media de las importancias (todos las utilizan indistintamente). La selección de la máxima (o mínima importancia) no la utilizan, pues todos coinciden en que los impactos que tienen valores de importancias muy altos son tratados independientemente, por lo que no son utilizados para el cálculo de las importancias globales; igualmente desechan los valores muy pequeños.

La suma de las variables, para el cálculo de la importancia del impacto, algunos la utilizan, pero no es su método preferido

Encuesta: Acciones mineras

El primer cuestionarios realizado para esta encuesta permitió conocer cuales son las acciones potencialmente impactantes y las etapas de un proyecto minero. Esta encuesta tuvo además una segunda fase que permitió establecer un orden de las acciones en cuanto la necesidad de realizarles evaluaciones de impacto ambiental.

Cuestionario 1: Acciones Mineras

1. ¿Cuáles considera UD. son las acciones que intervienen en un proyecto minero que provocan impactos ambientales? Marque su selección con una X.

<input type="checkbox"/>	Fase de investigación y planificación
<input type="checkbox"/>	Contratación del personal temporal
<input type="checkbox"/>	Servicios topográficos
<input type="checkbox"/>	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
	Encargo 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
	Escombreo
	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
	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
	Disposición de relaves
	Almacenamiento de los productos
	Almacenaje de insumos
	Disposición de residuos sólidos
	Mantenimiento
	Fase de desactivación
	Rehabilitación de áreas minadas
	Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas
	Remoción de insumos y residuos
	Demolición de edificios

Otras consideraciones:

Cuestionario 2: Acciones Mineras

1. Ordene las acciones mineras siguientes por prioridad (orden descendente) en cuanto a la necesidad de realizarles evaluaciones de impacto ambiental (27 más prioritaria, ..., 1 menos prioritaria).

Fase de investigación y planificación	
Apertura de vías de acceso	
Instalación de campamentos	
Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica	
Perforación y recolección de testigos	
Apertura (Fase de implantación)	
Contratación de servicios de terceros	
Trabajos topográficos	
Trabajos de perforación geológica	
Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso	
Desbroce	
Escombreo	
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 apoyo	
Disposición de residuos sólidos	
Operación (Fase de operación)	
Decapado del yacimiento	
Carga y transporte del mineral y estéril	
Disposición de estéril	
Extracción del mineral	
Almacenamiento del mineral	
Transporte de maquinarias y equipos	
Mantenimiento de caminos	
Disposición de relaves	
Disposición de residuos sólidos	
Mantenimiento	
Abandono (Fase de desactivación)	
Rehabilitación de áreas minadas	
Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas	

Otras consideraciones:

Análisis de los resultados

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Si (frec. rel)
Fase de investigación y planificación								
Contratación del personal temporal	1	0	0	1	0	0	0	0.29
Servicios topográficos	0	0	0	0	0	0	0	0
Apertura de vías de acceso	1	1	1	1	1	1	1	1
Instalación de campamentos	1	1	1	1	1	1	1	1
Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica	0	1	0	0	1	1	1	0.57
Perforación y recolección de testimonios	1	1	0	1	1	0	1	0.71
Retiro de material para ensayos	0	0	0	0	0	0	0	0
Realización de ensayos de laboratorio a escala-piloto	0	0	0	0	0	0	0	0
Elaboración de proyecto de ingeniería	0	0	0	0	0	0	0	0
Fase de implantación								0
Contratación de servicios de terceros	1	1	1	0	1	1	1	0.86
Encargue de máquinas y equipamientos	0	0	0	0	0	0	0	0
Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso	1	1	1	1	0	1	0	0.71
Implantación de cantero de obras	0	0	1	1	0	0	0	0.29
Contratación de mano de obra para la construcción	0	0	0	0	0	0	0	0
Trabajos topográficos	1	1	1	1	1	1	1	1
Trabajos de perforación geológica	1	1	1	1	1	1	1	1
Escombreo	1	1	1	1	1	1	1	1
Remoción de la vegetación (Desbroce)	1	1	1	1	1	1	1	1
Desbroce y terraplenado	1	0	1	0	0	1	1	0.57
Almacenaje del suelo vegetal	0	0	0	0	0	0	0	0
Preparación de las áreas de disposición de estériles y relaves	1	1	0	0	1	1	1	0.71
Instalación de línea de transmisión de energía eléctrica o instalación de grupo generador	1	0	0	1	0	1	0	0.43
Implantación de sistema de captación y almacenamiento de agua	1	1	1	0	0	1	0	0.57
Construcción y montaje de las instalaciones de apoyo	1	1	0	1	1	1	1	0.86
Disposición de residuos sólidos	1	1	1	1	1	1	1	1
Fase de operación								0
Remoción de vegetación	0	0	0	0	0	0	0	0
Decapado del yacimiento	0	1	1	1	1	1	0	0.71
Drenaje de la cantera y áreas operacionales	0	0	0	0	0	0	0	0
Cargamento y transporte del mineral y estéril	0	1	1	1	1	1	1	0.86
Disposición de estéril	1	1	1	1	1	0	1	0.86
Disposición temporaria de suelo vegetal	0	0	0	0	0	0	0	0
Extracción del mineral	1	1	1	1	1	1	1	1
Almacenamiento del mineral	1	1	0	1	0	0	0	0.43
Transporte de maquinarias y equipos	1	1	1	1	1	1	1	1
Mantenimiento de caminos	1	1	0	1	0	1	1	0.71
Disposición de relaves	1	1	1	1	1	1	1	1
Disposición de residuos sólidos	1	1	1	1	1	1	1	1
Mantenimiento	1	1	0	0	1	0	0	0.43
Fase de desactivación								
Rehabilitación de áreas minadas	1	1	1	1	1	1	1	1
Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas	1	1	0	1	0	1	1	0.71
Remoción de insumos y residuos	0	0	0	0	0	0	0	0
Demolición de edificios	0	0	0	0	0	0	0	0

El análisis de la segunda fase de esta encuesta se realizó utilizando la Prueba de Concordancia de Kendall

Coefficiente de concordancia de Kendall

$$K = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}$$

Donde $S = \sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})^2$

Siendo $m = 7$ (número de expertos), $n = 27$ (número de aspectos a evaluar, las acciones mineras), S_j es la suma de los rangos para el aspecto j , y \bar{S} es la media de la suma de los rangos.

Si $K = 0$ no existe acuerdo entre los expertos, si $K = 1$, existe total acuerdo entre los expertos, luego de procesar los datos se obtuvo que $K = 0,78$ por lo que se acepta que existe acuerdo entre los expertos consultados.

Acciones mineras	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Suma	(S-Sm)²	Peso
Apertura de vías de acceso	21	18	20	17	15	18	20	129	961	0.04871601
Instalación de campamentos	20	17	14	19	9	20	18	117	361	0.04418429
Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica	14	8	7	16	10	9	17	81	289	0.03058912
Perforación y recolección de testigos	13	7	19	15	19	25	25	123	625	0.04645015
Contratación de servicios de terceros	12	6	1	14	8	8	13	62	1296	0.0234139
Trabajos topográficos	19	16	23	27	18	16	21	140	1764	0.05287009
Trabajos de perforación geológica	25	15	21	26	27	24	26	164	4356	0.06193353
Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso	26	25	26	24	17	21	23	162	4096	0.06117825
Desbroce	27	27	25	25	26	27	27	184	7396	0.0694864
Escombreo	22	19	24	13	24	22	19	143	2025	0.05400302
Preparación de las áreas de disposición de estériles y relaves	10	14	18	12	11	15	14	94	16	0.03549849
Instalación de línea de transmisión de energía eléctrica o instalación de grupo generador	11	13	13	11	12	14	12	86	144	0.03247734
Implantación de sistema de captación y almacenamiento de agua	9	12	3	10	13	13	6	66	1024	0.02492447
Construcción y montaje de las instalaciones de apoyo	23	11	12	9	14	11	11	91	49	0.03436556
Disposición de residuos sólidos	8	10	4	8	16	10	9	65	1089	0.02454683
Decapado del yacimiento	7	9	5	7	7	5	7	47	2601	0.01774924
Carga y transporte del mineral y estéril	18	24	17	23	22	26	22	152	2916	0.05740181
Disposición de estéril	6	5	6	6	2	6	8	39	3481	0.0147281
Extracción del mineral	24	26	27	22	20	19	15	153	3025	0.05777946
Almacenamiento del mineral	5	4	8	5	1	7	10	40	3364	0.01510574
Transporte de maquinarias y equipos	17	23	16	18	21	17	16	128	900	0.04833837
Mantenimiento de caminos	16	21	15	21	23	23	17	136	1444	0.05135952
Disposición de relaves	4	3	9	4	3	4	3	30	4624	0.01132931
Disposición de residuos sólidos	3	2	10	3	5	2	1	26	5184	0.00981873
Mantenimiento	2	22	11	2	4	1	2	44	2916	0.01661631
Rehabilitación de áreas minadas	15	20	22	20	15	12	24	128	900	0.04833837
Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas	1	1	2	1	6	3	4	18	6400	0.00679758
									63246	

Luego las acciones mineras fueron ordenadas por peso.

Peso	Acción Minera
0.069	Desbroce
0.062	Trabajos de perforación geológica
0.061	Construcción o servicios de mejoría de las vías de acceso
0.058	Extracción del mineral
0.057	Carga y transporte del mineral y estéril
0.054	Escombreo
0.053	Trabajos topográficos
0.051	Mantenimiento de caminos
0.049	Apertura de vías de acceso
0.048	Transporte de maquinarias y equipos
0.048	Rehabilitación de áreas minadas
0.046	Perforación y recolección de testigos
0.044	Instalación de campamentos
0.035	Preparación de las áreas de disposición de estériles y relaves
0.034	Construcción y montaje de las instalaciones de apoyo
0.032	Instalación de línea de transmisión de energía eléctrica o instalación de grupo generador
0.031	Mapeo geológico, prospección geofísica y geoquímica
0.025	Implantación de sistema de captación y almacenamiento de agua
0.025	Disposición de residuos sólidos
0.023	Contratación de servicios de terceros
0.018	Decapado del yacimiento
0.017	Mantenimiento
0.015	Almacenamiento del mineral
0.015	Disposición de estéril
0.011	Disposición de relaves
0.010	Disposición de residuos sólidos
0.007	Desmontaje de las instalaciones eléctricas y mecánicas

Se obtuvo que las acciones mineras que más dañan al medio ambiente son las listadas a continuación; siendo la operación de Desbroce la más impactante al medio.

- Desbroce
- Trabajos de perforación geológica
- Construcción de vías de acceso
- Extracción del mineral
- Carga y transporte del mineral y estéril
- Escombreo
- Trabajos topográficos
- Mantenimiento de caminos
- Apertura de vías de acceso

- Transporte de maquinarias y equipos
- Rehabilitación de áreas minadas
- Perforación y recolección de testigos
- Instalación de campamentos

Los expertos concuerdan en que la acción Disposición de desechos sólidos no se encuentra entre las más impactantes, pues todo proyecto debe tener un plan para el manejo de los desechos sólidos, que debe planificarse a la par de la planificación del proyecto en sí. Así mismo, consideran que es muy importante realizar la evaluación del impacto de la acción Rehabilitación de áreas minadas (tareas propuestas para el mejoramiento del entorno), pues es necesario conocer cuanto podría mejorar el medio tras su ejecución.

Encuesta: Factores Ambientales

Cuestionario: Factores Ambientales

1. ¿Qué factores ambientales tiene UD. en cuenta para realizar las evaluaciones de impacto? Marque con una X los factores que UD. utiliza.

Selección	Factor Ambiental
	Geología y Geomorfología
	Relieve
	Recursos hídricos
	Procesos geomorfológicos
	Suelo
	Aguas terrestres
	Calidad del agua
	Aguas superficiales
	Aguas subterráneas
	Océano
	Aguas costeras
	Clima
	Aire
	Material particulado
	Ruido
	Calidad del aire
	Flora y vegetación
	Cubierta vegetal
	Fauna
	Relaciones ecológicas
	Paisaje
	Uso del suelo
	Población
	Educación
	Salud
	Empleo
	Seguridad ocupacional
	Infraestructura
	Viales

	Obras hidráulicas
	Infraestructura eléctrica
	Economía
	Patrimonio histórico, arqueológico y cultural

b) Proponga si deben considerarse otros factores ambientales

Factor Ambiental	Valoración

Análisis de los resultados

Factor Ambiental	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Total
Geología y Geomorfología	1	1	1	1	1	1	1	7
Relieve	1	0	0	0	1	0	1	3
Recursos hídricos	0	1	0	0	0	0	0	1
Procesos geomorfológicos	1	1	0	1	0	0	0	3
Suelo	1	1	1	1	1	1	1	7
Agua	1	1	1	1	1	1	0	6
Calidad del agua	0	1	0	0	0	0	1	2
Aguas superficiales	0	1	0	0	1	0	1	3
Aguas subterráneas	0	1	0	0	1	0	1	3
Océano	1	1	1	0	1	1	0	5
Aguas costeras	0	0	0	0	0	1	1	2
Clima	1	1	1	1	1	1	1	7
Aire	1	1	1	1	1	1	1	7
Material particulado	0	1	0	0	0	0	0	1
Ruido	0	1	0	0	0	1	0	2
Calidad del aire	0	0	0	0	0	1	0	1
Flora y vegetación	1	1	1	1	1	1	1	7
Cubierta vegetal	0	0	0	0	0	0	0	0
Fauna	1	1	1	1	1	1	1	7
Relaciones ecológicas	1	1	1	1	1	0	0	5
Paisaje	1	1	1	1	1	1	1	7
Uso del suelo	1	1	1	1	1	1	1	7
Población	1	1	1	1	1	1	1	7
Educación	0	0	1	0	0	0	0	1
Salud	0	0	1	0	0	0	0	1
Empleo	0	0	1	0	0	0	0	1
Seguridad ocupacional	0	0	1	0	1	1	0	3
Infraestructura	1	1	0	1	1	1	1	6
Viales	0	0	1	0	0	0	0	1
Obras hidráulicas	0	0	1	0	0	0	0	1
Infraestructura eléctrica	0	0	1	0	0	0	0	1
Economía	1	1	1	1	1	1	1	7
Patrimonio histórico, arqueológico y cultural	1	1	1	1	1	1	1	7

Fueron seleccionados los factores ambientales que fueron seleccionados por más de 3 expertos.

Anexo II REVISIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS POR LOS EXPERTOS

Los resultados obtenidos, la metodología difusa para la evaluación en el tiempo del impacto ambiental y su aplicación a un caso de estudio, fueron mostrados a expertos ambientales con el fin de validar la propuesta que se presenta en la presente memoria.

Encuesta realizada a los expertos ambientales

ESTIMADO SEÑOR(A):

Ha sido Ud. seleccionado en calidad de experto para colaborar con la investigación “Metodología para el Seguimiento en el Tiempo del Impacto Ambiental en Proyectos Mineros”. En tal sentido se elabora esta encuesta cuyo objetivo es: *Validación cualitativa sobre la concepción del modelo de Evaluación en el Tiempo del Impacto Ambiental y los procedimientos y concepción de una metodología de evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros.*

I. Sobre la concepción del modelo de la Evaluación en el Tiempo del Impacto Ambiental.

1. ¿En qué medida el modelo propuesto sintetiza las ideas acerca del seguimiento de la evolución en el tiempo del impacto ambiental?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

II. Sobre los procedimientos concebidos como basamento de la metodología.

La concepción de la metodología de evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros conlleva una serie de procedimientos relacionados unos con otro. Sobre los mismos, valore usted lo siguiente:

- ¿En qué medida se permite la caracterización del entorno y del proyecto que se evalúa?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

2. ¿En qué medida las características identificadas permiten predecir los futuros impactos del proyecto?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

3. ¿Cómo valora Ud. la propuesta de identificación, predicción y diagnóstico por hitos del proyecto?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

4. ¿Cómo valora Ud. el proceso de estimación y selección de las medidas correctoras?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

5. ¿En qué medida las etapas de la metodología y los objetivos de cada una de ellas conducen al logro de una evaluación de impacto ambiental global y totalizadora?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

6. La utilización de la metodología propuesta permite contribuir a la eliminación de las deficiencias detectadas de forma:

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

III. Sobre el sistema informático presentado.

7. ¿En qué medida se adecua el sistema informático SIAM a sus necesidades como evaluador de impacto ambiental?

<i>Muy Adecuada</i> (5)	<i>Bastante Adecuada</i> (4)	<i>Adecuada</i> (3)	<i>Poco Adecuada</i> (2)	<i>No Adecuada</i> (1)

8. ¿Cómo valora Ud. los resultados obtenidos con la utilización de técnicas difusas?

<i>Muy Adecuada (5)</i>	<i>Bastante Adecuada (4)</i>	<i>Adecuada (3)</i>	<i>Poco Adecuada (2)</i>	<i>No Adecuada (1)</i>

9. ¿Cómo valora Ud. la presentación de la información y los resultados?

<i>Muy Adecuada (5)</i>	<i>Bastante Adecuada (4)</i>	<i>Adecuada (3)</i>	<i>Poco Adecuada (2)</i>	<i>No Adecuada (1)</i>

En todos los casos, si lo considera necesario incluya posibles propuestas y recomendaciones.

Escala valorativa:

- 5 Muy adecuada.
- 4 Bastante adecuada.
- 3 Adecuada.
- 2 Poco adecuada.
- 1 No adecuada.

Resultados de las respuestas de los expertos

<i>EXPERTOS</i>	<i>PREGUNTAS</i>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5
2	4	4	4	4	5	4	4	4	5	5
3	5	4	4	4	5	4	5	4	5	5
4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5
5	4	4	4	4	5	5	5	4	4	5
6	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5
7	4	4	4	4	4	4	5	4	5	5
8	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4
9	4	4	4	4	4	5	5	4	4	5
10	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4
11	4	4	4	4	5	5	4	4	4	5
12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
13	5	4	4	4	5	4	4	4	4	5
14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
15	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4

Se puede concluir que los quince expertos concuerdan tanto en la efectividad del modelo difuso y de seguimiento en el tiempo de EIA como en los procedimientos y métodos concebidos para el establecimiento de la metodología de evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros.

No obstante la correlación general existente entre los criterios de los expertos, se realizaron las recomendaciones y sugerencias que a continuación se exponen:

- Permitir la predicción de efectos secundarios a partir de la valoración de los indicadores ambientales.
- Incluir mecanismos para la recomendación de cambios en el proyecto, no dejarlo sólo a la decisión de los expertos ambientales.
- Incluir métodos para la obtención directa de los valores de los indicadores ambientales de la red de monitoreo ambiental, podría utilizarse en una primera etapa la red de monitoreo atmosférico, de la cual en estos momentos se está haciendo el montaje.

Anexo III INDICADORES AMBIENTALES

A continuación se muestra la descripción de los indicadores ambientales más usados por los expertos ambientales para conocer el estado del medio ambiente. Para la valoración los expertos tuvieron en cuenta las Normas Cubanas relacionadas con el Medio Ambiente y los estándares internacionales (para más detalles ver [10], [29 - 32], [61 - 67], [79], [82 - 84])

1. Factor Ambiental: Geología y Geomorfología

1.1 Carácter del relieve

1.2 Superficie erosionada

Indicador:	<i>Carácter del relieve</i>	
Descripción:	Diferencia del relieve según los diferentes tipos (Suave, Irregular Escarpado).	
Método de Cálculo:	Diferencia de altura entre los distintos tipos de relieve.	
Unidades:	Metros	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-50	Muy Baja	Muy Baja
50-100	Baja	Baja
100-150	Moderada	Aceptable
150-250	Alta	Alta
Mayor que 250	Muy Alta	Muy Alta

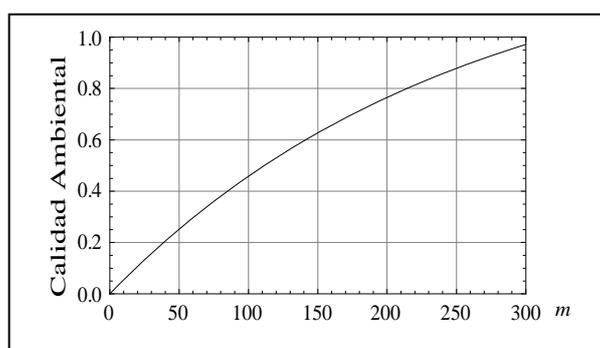


Fig. III.1 Función de transformación del indicador ambiental: *Carácter del relieve*

Indicador:	<i>Superficie erosionada</i>
Descripción:	Porcentaje del área total del proyecto afectada por la erosión
Método de Cálculo:	$S_E = 100 \left(\frac{S}{S_T} \right)$ <p>Donde S es la superficie afectada por la erosión y S_T, la superficie total del proyecto.</p>

Unidades:	Por ciento (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Muy Leve	Muy Baja
20-40 %	Leve	Baja
40-60 %	Media	Aceptable
60-80 %	Fuerte	Alta
80-100 %	Muy Fuerte	Muy Alta

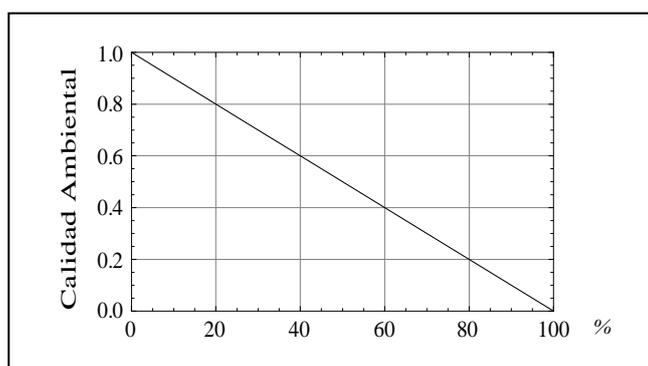


Fig. III.2 Función de transformación del indicador ambiental: Superficie erosionada

2. Factor Ambiental: Aire

- 2.1 Material Particulado
- 2.2 Concentración de Monóxido de Carbono
- 2.3 Nivel de ruido

Indicador:	<i>Material particulado</i>	
Descripción:	Promedio de la concentración media de partículas sólidas en el aire en 24 horas durante tres días consecutivos.	
Método de Cálculo:	Estimación o medida directa por métodos de campo.	
Unidades:	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-30	Aceptable	Muy Baja
31-54	Moderada	Baja
55-154	Notable	Aceptable
155-354	Elevada	Alta
Mayor de 355	Muy Elevada	Muy Alta

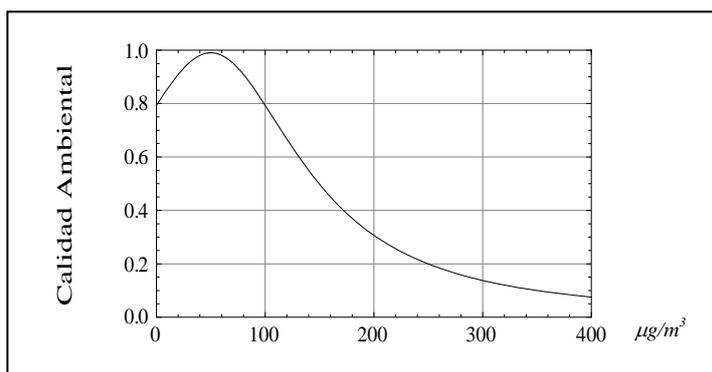


Fig. III.3 Función de transformación del indicador ambiental: *Material particulado*

Indicador:	<i>Concentración de Monóxido de Carbono (CO)</i>	
Descripción:	Nivel de inmisión ponderado por el número de personas afectadas.	
Método de Cálculo:	$NIP = (I \times h_1) / h_2$ Donde I representa el nivel de inmisión en 24 h, h_1 , el número de personas afectadas y h_2 , el número total de habitantes de la zona considerada. El nivel de inmisión se calcula por Estimación o a través de la medición directa por métodos de campo.	
Unidades:	p.p.m	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-6.5	Aceptable	Muy Baja
6.5-10	Moderada	Baja
10-17	Notable	Aceptable
17-30	Elevada	Alta
Mayor de 30	Muy Elevada	Muy Alta

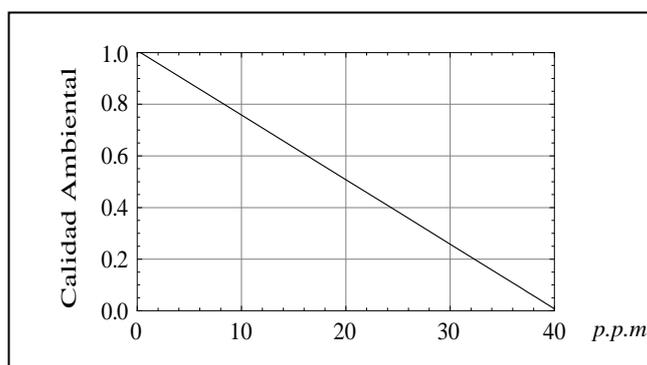


Fig. III.4 Función de transformación del indicador ambiental: Concentración de Monóxido de Carbono (CO)

Indicador:	<i>Nivel de ruido</i>	
Descripción:	Medición de los niveles sonoros teniendo en cuenta la cantidad de personas afectadas.	
Método de Cálculo:	$Leq.P = (Leq \times h_1) / h_2$ Donde Leq representa el nivel sonoro equivalente, h_1 , el número de personas afectadas y h_2 , el número total de habitantes de la zona considerada.	
Unidades:	dBA	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
40-45	Muy Bajo	Muy Baja
45-50	Bajo	Baja
50-55	Moderado	Aceptable
55-65	Alto	Alta
Mayor de 55	Muy Alto	Muy Alta

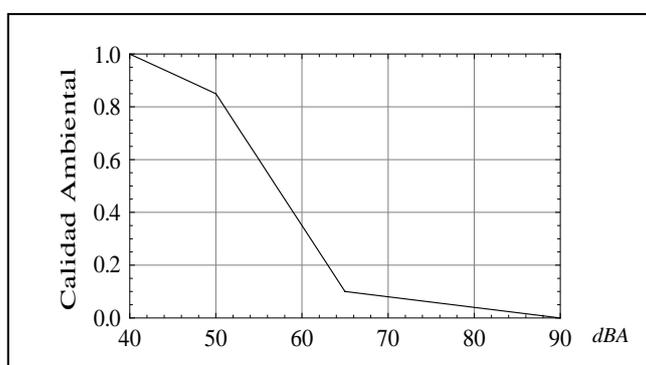


Fig. III.5 Función de transformación del indicador ambiental: *Nivel de ruido*

3. Factor Ambiental: Suelo

- 3.1 Espesor de la capa fértil
- 3.2 Nivel de humedad
- 3.3 Nivel de compactación
- 3.4 Superficie erosionada (ver 1.2)
- 3.5 Salinidad

Indicador:	<i>Espesor de la capa fértil</i>
Descripción:	Medida en el porcentaje que representa la capa fértil del suelo afectado respecto al valor aceptable para un suelo natural sin afectaciones.
Método de Cálculo:	$ECF = 100 \left(\frac{E}{E_a} \right)$ <p>Donde E representa el espesor de la capa fértil y E_a, el valor aceptable para un suelo sin afectaciones. El valor de E se calcula por estimación o a través de la medición directa por métodos de campo.</p>
Unidades:	Porcentaje (%)

Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Muy Baja	Muy Alta
20-40 %	Baja	Alta
40-60 %	Aceptable	Aceptable
60-80 %	Alta	Baja
80-100 %	Muy Alta	Muy Baja

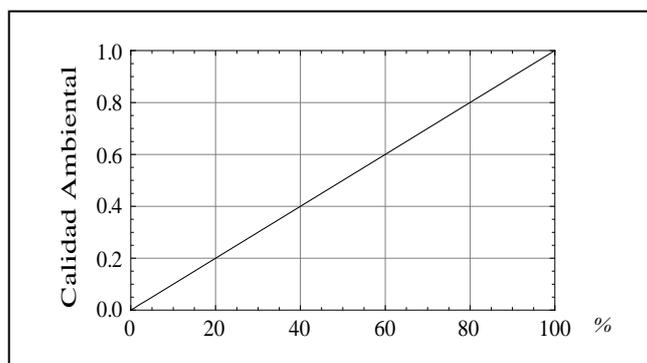


Fig. III.6 Función de transformación del indicador ambiental: *Espesor de la capa fértil*

Indicador:	<i>Nivel de humedad</i>	
Descripción:	Medida del porcentaje que representa la humedad del suelo afectado respecto a los niveles de humedad también se deberían tener para un entorno poco afectado.	
Método de Cálculo:	$NHS = 100 \left(\frac{H}{H_a} \right)$ <p>Donde H representa la humedad actual del suelo y H_a, el valor de humedad aceptable para un suelo sin afectaciones. El valor de H se calcula por estimación o a través de la medición directa por métodos de campo.</p>	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Muy Bajo	Muy Alta
20-40 %	Bajo	Alta
40-60 %	Aceptable	Aceptable
60-80 %	Alto	Baja
80-100 %	Muy Alto	Muy Baja

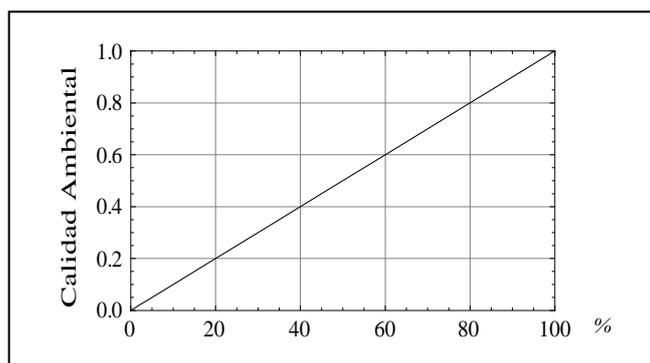


Fig. III.7 Función de transformación del indicador ambiental: *Nivel de humedad*

Indicador:	<i>Nivel de compactación</i>	
Descripción:	Medida del porcentaje que representa el área afectada por la compactación del suelo respecto al área total del proyecto.	
Método de Cálculo:	$NC = 100 \left(\frac{S}{S_T} \right)$ Donde <i>S</i> representa la superficie afectada por la compactación y <i>S_T</i> , el área total afectada por el proyecto.	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Nulo	Muy Baja
20-40 %	Aceptable	Baja
40-60 %	Moderado	Aceptable
60-80 %	Severo	Alta
80-100 %	Crítico	Muy Alta

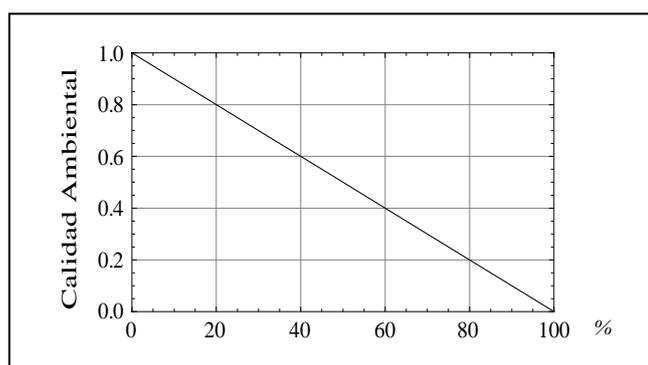


Fig. III.8 Función de transformación del indicador ambiental: *Nivel de compactación*

Indicador:	<i>Salinidad</i>	
Descripción:	Medida del porcentaje de variación de la salinidad del suelo con respecto a la natural.	
Método de Cálculo:	$\text{Salinidad} = \frac{CE - CE_{nat}}{CE_{nat}}$ Donde CE_{nat} es la conductividad eléctrica en condiciones naturales, anterior a cualquier alteración humana.	
Unidades:	Por ciento (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor: <i>Salinidad</i>	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-8	No salino	Muy Baja
8-16	Ligeramente salino	Baja
16-24	Salino	Aceptable
24-32	Muy salino	Alta
Mayor de 32	Extremadamente salino	Muy Alta

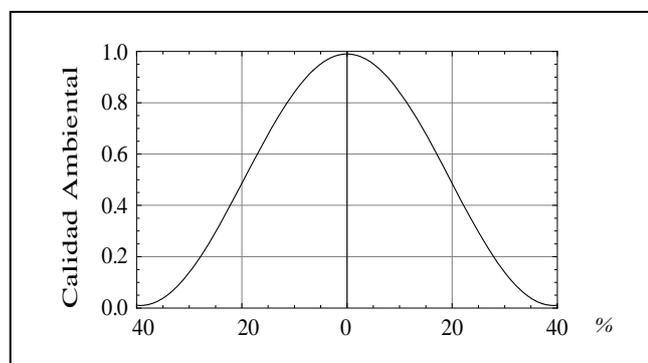


Fig. III.9 Función de transformación del indicador ambiental: *Salinidad*

4. Factor Ambiental: Agua

- 4.1 Partículas en suspensión
- 4.2 Turbidez
- 4.3 Temperatura
- 4.4 Red de drenaje afectada
- 4.5 Nivel piezométrico

Indicador:	<i>Turbidez</i>	
Descripción:	Medida del enturbiamiento de las aguas (subterráneas y superficiales) afectadas por el proyecto. El agua pierde su turbidez a partir de la presencia de sólidos en suspensión.	
Método de Cálculo:	Estimación o medida directa por métodos de campo.	
Unidades:	NTU (Unidad Nefelométrica de turbidez)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-2.5	Muy Baja	Muy Baja

2.5-5	Baja	Baja
5-7	Moderada	Aceptable
7-9	Alta	Alta
Mayor de 9	Muy Alta	Muy Alta

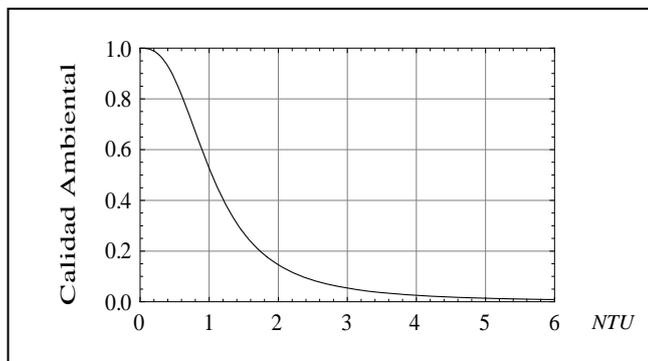


Fig. III.10 Función de transformación del indicador ambiental: *Turbidez*

Indicador:	<i>Temperatura</i>	
Descripción:	Representa la diferencia de los niveles actuales de temperatura y los niveles considerados de equilibrio natural	
Método de Cálculo:	Estimación o medida directa por métodos de campo.	
Unidades:	°C (Grado centígrado)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor: <i> Temperatura </i>	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-3	Muy Baja	Muy Baja
3-6	Baja	Baja
6-9	Moderada	Aceptable
9-12	Alta	Alta
Mayor de 12	Muy Alta	Muy Alta

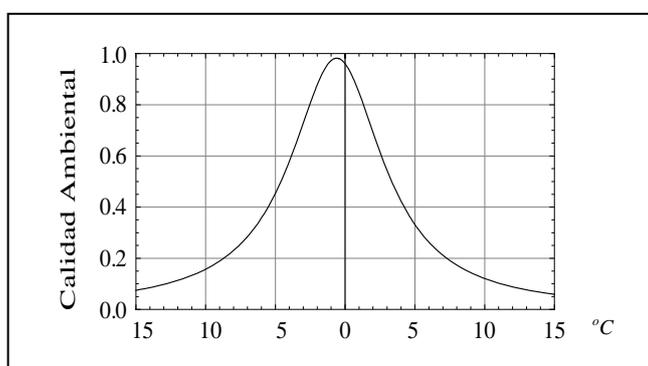


Fig. III.11 Función de transformación del indicador ambiental: *Temperatura*

Indicador:	<i>Nivel piezométrico</i>	
Descripción:	Representa la profundidad a la que se encuentra el nivel del agua subterránea en el suelo, y se mide en metro de columna de agua.	
Método de Cálculo:	Estimación o medida directa por métodos de campo.	
Unidades:	Metros	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
Mayor de 8	Muy Bajo	Muy Baja
6-8	Bajo	Baja
4-6	Moderada	Aceptable
2-4	Alta	Alta
0-2	Muy Alta	Muy Alta

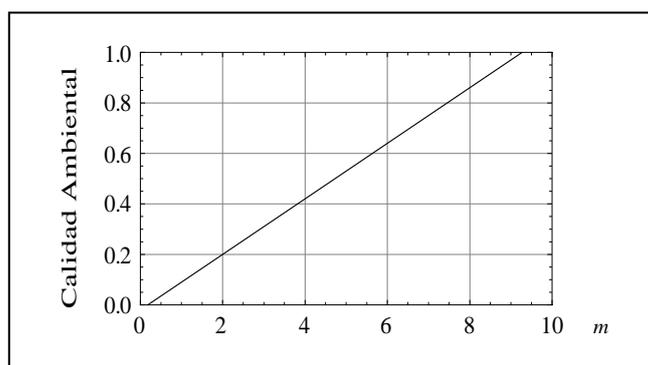


Fig. III.12 Función de transformación del indicador ambiental: *Nivel piezométrico*

Indicador:	<i>Red de drenaje afectada</i>	
Descripción:	Medida de la afectación de la red de drenaje del área del proyecto	
Método de Cálculo:	$RDA = 100 \times \frac{\sum T_i C_i}{S_T}$ <p>Donde T_i representa el área de cada tramo y/o superficie de agua, C_i, el tipo de corriente del tramo, y S_T el área total del proyecto. Los valores T_i y C_i se obtienen por estimación o medida directa por métodos de campo.</p>	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Muy Baja	Muy Baja
20-40 %	Baja	Baja
40-60 %	Moderada	Aceptable
60-80 %	Alta	Alta
80-100 %	Muy Alta	Muy Alta

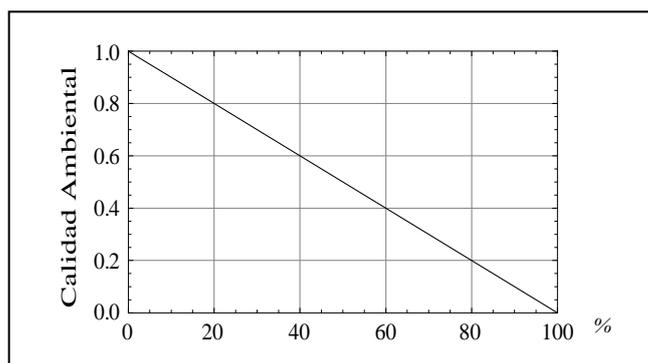


Fig. III.13 Función de transformación del indicador ambiental: *Red de drenaje afectada*

5. Factor Ambiental: Clima

5.1 Temperatura media

Indicador:	<i>Temperatura media</i>	
Descripción:	Valor de desviación de la temperatura con respecto a la temperatura media	
Método de Cálculo:	Estimación o medida directa por métodos de campo.	
Unidades:	Grados centígrados (°C)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-3	Muy Baja	Muy Baja
3-6	Baja	Baja
6-9	Moderada	Aceptable
9-12	Alta	Alta
Mayor de 12	Muy Alta	Muy Alta

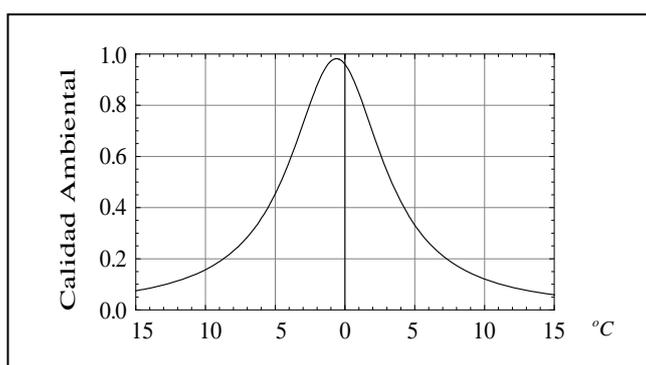


Fig. III.14 Función de transformación del indicador ambiental: *Temperatura media*

6. Factor Ambiental: Flora y vegetación

- 6.1 Diversidad
- 6.2 Especies amenazadas
- 6.3 Superficie cubierta
- 6.4 Cantidad de árboles observables

Indicador:	<i>Diversidad</i>	
Descripción:	Número de especies por mil individuos.	
Método de Cálculo:	Estimación o medida directa por métodos de campo.	
Unidades:	‰	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0-2	Nula	Muy Alta
2-4	Aceptable	Alta
4-6	Moderada	Aceptable
6-8	Elevada	Baja
Mayor de 8	Muy Elevada	Muy Baja

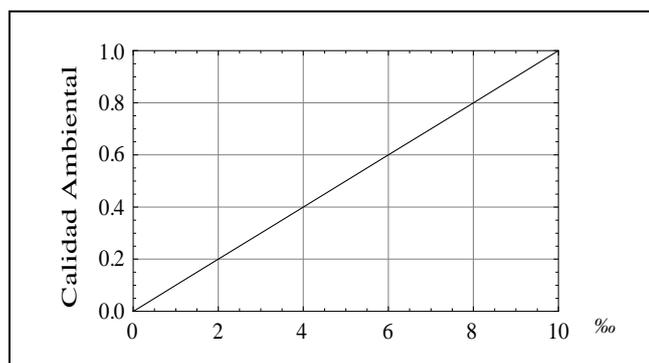


Fig. III.15 Función de transformación del indicador ambiental: *Diversidad*

Indicador:	<i>Especies amenazadas</i>	
Descripción:	Medida del peligro de las especies de la zona.	
Método de Cálculo:	$EA = \frac{\sum E_i}{n}$	
	Donde n representa el total de especies de la zona, y E_i , la amenaza del proyecto para la especie i , dada en los siguientes valores: 2: En vías de extinción, 3: Rara en la zona, 4: Rara en Cuba, 5: Rara en la zona o endémica en Cuba, 6: Endémica en Cuba, 7: Endémica en la zona, 8: Frecuente en la zona, 9: Común en la zona, 10: Muy común en la zona	
Unidades:	Adimensional	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
	Nulo	Muy Baja
	Aceptable	Baja
	Moderado	Aceptable

	Severo Crítico	Alta Muy Alta
--	-------------------	------------------

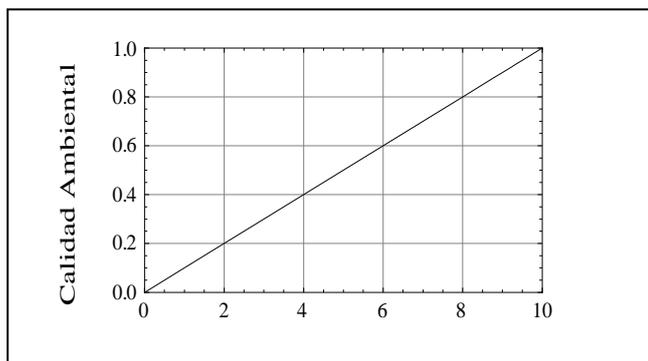


Fig. III.16 Función de transformación del indicador ambiental: *Especies amenazadas*

Indicador:	<i>Superficie cubierta</i>	
Descripción:	Medida del porcentaje del área total del proyecto cubierta por vegetación.	
Método de Cálculo:	$SC = 100 \times \frac{S}{S_T}$ Donde <i>S</i> representa la superficie cubierta por vegetación, y <i>S_T</i> , la superficie total del proyecto.	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Muy Baja	Muy Alta
20-40 %	Baja	Alta
40-60 %	Aceptable	Aceptable
60-80 %	Alta	Baja
80-100 %	Muy Alta	Muy Baja

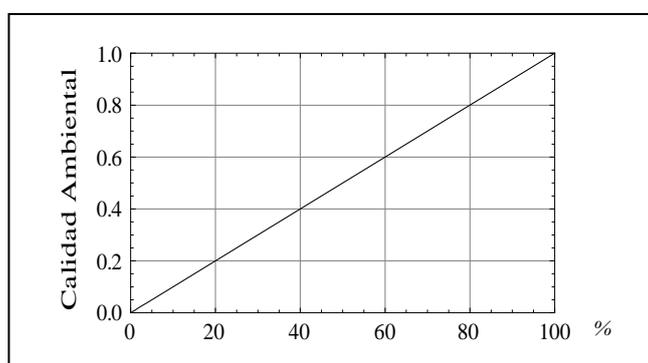


Fig. III.17 Función de transformación del indicador ambiental: *Superficie cubierta*

Indicador:	<i>Cantidad de árboles observables</i>	
Descripción:	Medida perceptual del paisaje (escasos, comunes, abundantes)	
Método de Cálculo:	Estimación.	
Unidades:	Adimensional	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
	Abundantes	Muy Baja
	Bastante Comunes	Baja
	Comunes	Aceptable
	Escasos	Alta
	Muy escasos	Muy Alta

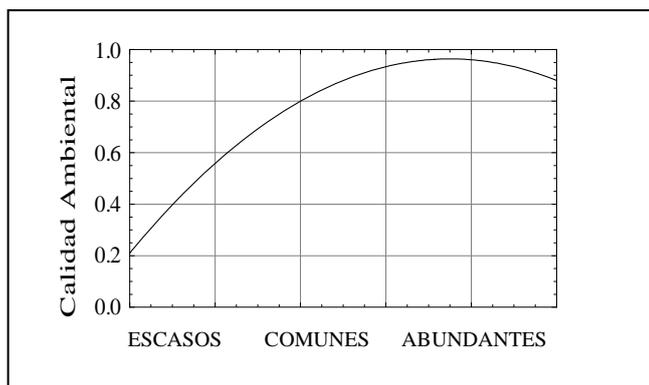


Fig. III.18 Función de transformación del indicador ambiental: *Cantidad de árboles observables*

7. Factor Ambiental: Fauna

7.1 Especies amenazadas (ver 6.2)

7.2 Diversidad (ver 6.1)

7.3 Movilidad de especies

Indicador:	<i>Movilidad de especies</i>	
Descripción:	Medida de la superficie de hábitats afectados por el proyecto.	
Método de Cálculo:	$ME = 100 \times \frac{S}{S_T}$ Donde S representa la superficie total de hábitat afectados por el proyecto, y S_T , la superficie total del proyecto.	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
80-100 %	Muy Alta	Muy Baja
60-80 %	Alta	Baja
40-60 %	Moderada	Aceptable
20-40 %	Baja	Alta
0- 20 %	Muy Baja	Muy Alta

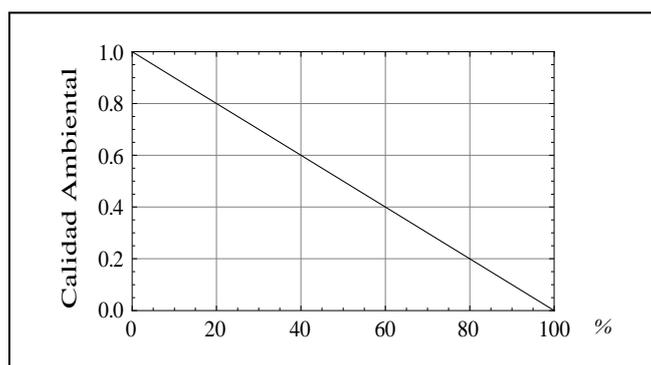


Fig. III.19 Función de transformación del indicador ambiental: *Movilidad de especies*

8. Factor ambiental: Paisaje

8.1 Cantidad de árboles observables (ver 6.4)

8.2 Calidad visual

8.3 Calidad del paisaje

Indicador:	<i>Calidad visual</i>	
Descripción:	Percepción de la calidad del visual	
Método de Cálculo:	Estimación	
Unidades:	Adimensional	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
	Relevante	Muy Baja
	Notable	Baja
	Moderada	Aceptable
	Poca	Alta
	Nula	Muy Alta

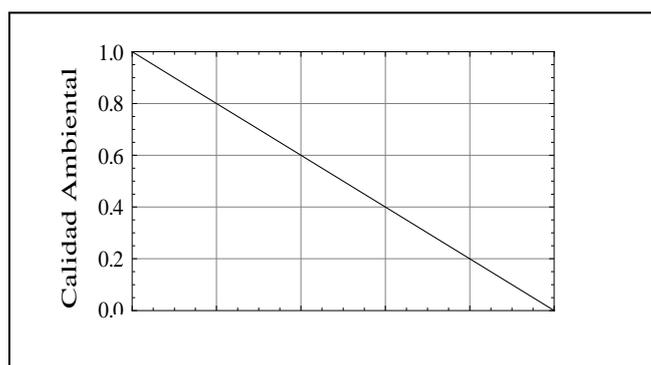


Fig. III.20 Función de transformación del indicador ambiental: *Calidad Visual*

Indicador:	<i>Calidad del paisaje</i>	
Descripción:	Percepción de la calidad del paisaje	
Método de Cálculo:	Estimación	
Unidades:	Adimensional	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
	Excelente	Muy Baja
	Notable	Baja
	Bueno	Aceptable
	Mediocre	Alta
	Degradado	Muy Alta

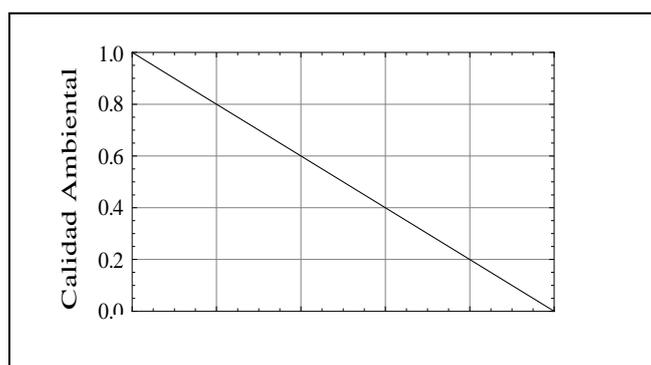


Fig. III.21 Función de transformación del indicador ambiental: *Calidad del paisaje*

9. Factor Ambiental: Uso del suelo

9.1 Uso del suelo

Indicador:	<i>Uso del suelo</i>	
Descripción:	Medida de la utilización de los suelos en el área de incidencia del proyecto.	
Método de Cálculo:	$US = 100 \times \frac{\sum w_i S_i}{S_T}$ <p>Donde w_i es el coeficiente de ponderación según el uso del suelo (1: natural, 0.8: forestal, 0.6: agrícola, 0.4: zona urbana, 0.2 industrial), S_i representa la superficie total del uso i, y S_T, la superficie total del área de incidencia del proyecto.</p>	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Muy Bajo	Muy Alta
20-40 %	Bajo	Alta
40-60 %	Moderado	Aceptable
60-80 %	Alto	Baja
80-100 %	Muy Alto	Muy Baja

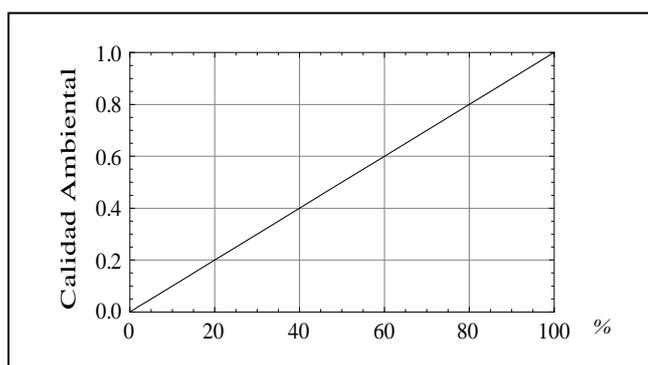


Fig. III.22 Función de transformación del indicador ambiental: *Uso del suelo*

10. Factor ambiental: Infraestructura

10.1 Infraestructura eléctrica

10.2 Nivel de afectación por construcciones

Indicador:	<i>Infraestructura eléctrica</i>	
Descripción:	Población afectada en cuanto al acceso y el suministro eléctrico	
Método de Cálculo:	$IE = 100 \times \frac{\sum \left(\frac{PAM_i}{P_i} \right)}{N}$ <p>Donde PAM_i es la población afectada mensualmente, P_i, la población en el entorno de la zona del proyecto y N el tiempo de duración del proyecto.</p>	
Unidades:	Porcentaje (%)	

Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 5 %	Mínima	Muy Baja
5-10 %	Poca	Baja
10-15 %	Moderada	Aceptable
15-25 %	Notable	Alta
Mayor de 25%	Elevada	Muy Alta

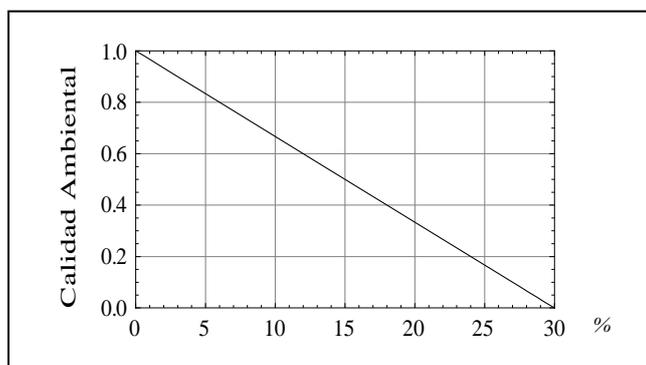


Fig. III.23 Función de transformación del indicador ambiental: *Infraestructura eléctrica*

Indicador:	<i>Nivel de afectación por construcciones</i>	
Descripción:	Índice de población afectada por construcción de edificaciones, caminos, etc.	
Método de Cálculo:	$IE = 100 \times \frac{\sum w_k \left(\frac{PAM_{ik}}{P_{ik}} \right)}{N}$ <p>Donde PAM_{ik} es la población afectada mensualmente, P_{ik}, la población en el entorno de la zona del proyecto, N el tiempo de duración del proyecto y w_k, el coeficiente de ponderación según el tipo de construcción.</p>	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 5 %	Mínima	Muy Baja
5-10 %	Poca	Baja
10-15 %	Moderada	Aceptable
15-25 %	Notable	Alta
Mayor de 25%	Elevada	Muy Alta

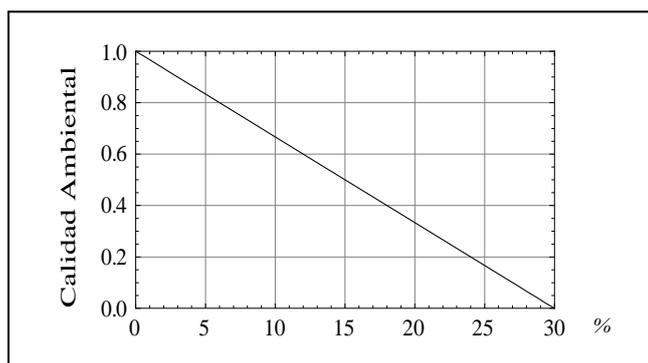


Fig. III.24 Función de transformación del indicador ambiental: Nivel de afectación por construcciones

11. Factor Ambiental: Población

- 11.1 Salud e higiene
- 11.2 Nivel de empleo

Indicador:	<i>Salud e higiene</i>	
Descripción:	Relación del número de personas afectadas y las existentes en el entorno del proyecto.	
Método de Cálculo:	$SH = 100 \times \left(1 - \frac{P_a}{P} \right)$ Donde P_a es la población afectada, P , la población en el entorno del proyecto.	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Mínima	Muy Baja
20-40 %	Poca	Baja
40-60 %	Moderada	Aceptable
60-80 %	Notable	Alta
80-100 %	Elevada	Muy Alta

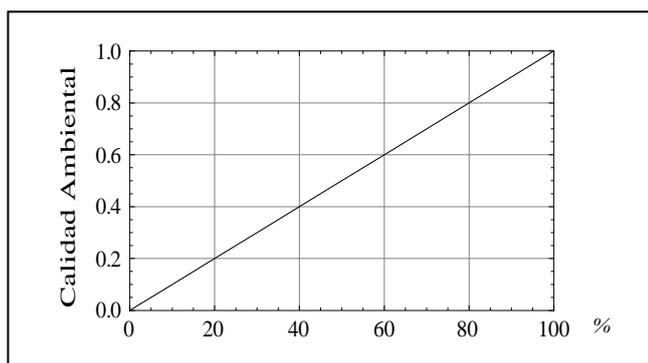


Fig. III.25 Función de transformación del indicador ambiental: Salud e higiene

Indicador:	<i>Nivel de empleo</i>	
Descripción:	Variación del índice de empleo en la zona del entorno del proyecto	
Método de Cálculo:	$NE = 100 \times \frac{P_E}{P}$ Donde P_E es la población empleada en actividades relacionadas con la minería y P , la población en el entorno del proyecto.	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
80-100 %	Muy Alto	Muy Alta
60-80 %	Alto	Alta
40-60 %	Notable	Aceptable
20-40 %	Moderado	Baja
0- 20 %	Bajo	Muy Baja

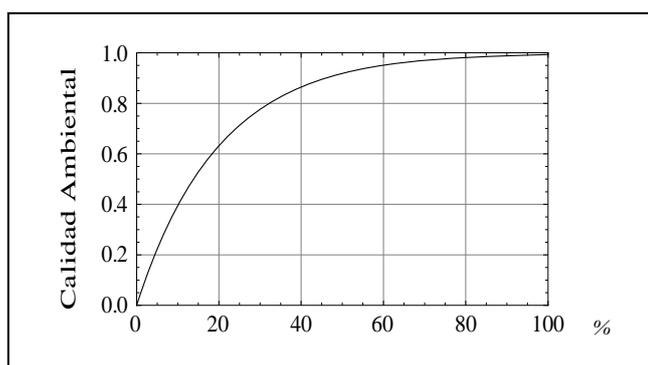


Fig. III.26 Función de transformación del indicador ambiental: *Nivel de empleo*

12. Factor Ambiental: Economía

- 12.1 Nivel de empleo (ver 11.2)
- 12.2 Incremento de los ingresos
- 12.3 Nivel de inversiones
- 12.4 Valor del suelo

Indicador:	<i>Incremento de los ingresos</i>	
Descripción:	Crecimiento de los ingresos para la economía nacional	
Método de Cálculo:	Crecimiento con respecto a los datos históricos.	
Unidades:	Miles de dólares (MM)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 5 %	Bajo	Muy Baja
5-10 %	Moderado	Baja
10-15 %	Notable	Aceptable
15-25 %	Alto	Alta
Mayor de 25%	Muy Alto	Muy Alta

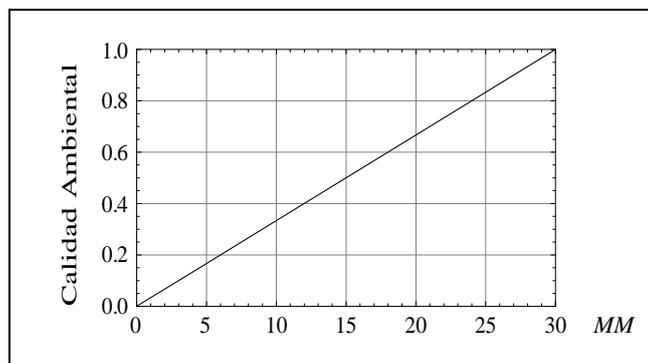


Fig. III.27 Función de transformación del indicador ambiental: *Incremento de los ingresos*

Indicador:	<i>Nivel de inversiones</i>	
Descripción:	Índice de variación en la realización de inversiones.	
Método de Cálculo:	Porcentaje que representan las inversiones realizadas de las proyectadas.	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
0- 20 %	Bajo	Muy Baja
20-40 %	Moderado	Baja
40-60 %	Notable	Aceptable
60-80 %	Alto	Alta
80-100 %	Muy Alto	Muy Alta

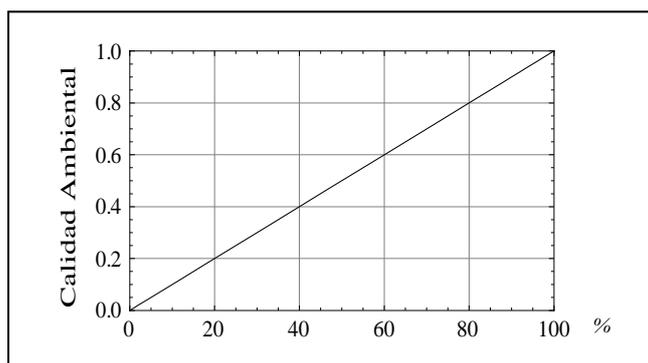


Fig. III.28 Función de transformación del indicador ambiental: Nivel de inversiones

Indicador:	<i>Valor del Suelo</i>	
Descripción:	Suelo afectado revalorizable	
Método de Cálculo:	$SR = 100 \times \frac{S_1 C}{S}$ Donde S_1 es la superficie del suelo que se revaloriza, S_2 superficie total del suelo afectado y C es un coeficiente de revalorización	
Unidades:	Porcentaje (%)	
Valoración de la Magnitud:		
Valor:	Etiquetas lingüísticas:	Magnitud:
80-100 %	Muy Alto	Muy Alta
60-80 %	Alto	Alta
40-60 %	Moderado	Aceptable
20-40 %	Bajo	Baja
0- 20 %	Muy Bajo	Muy Baja

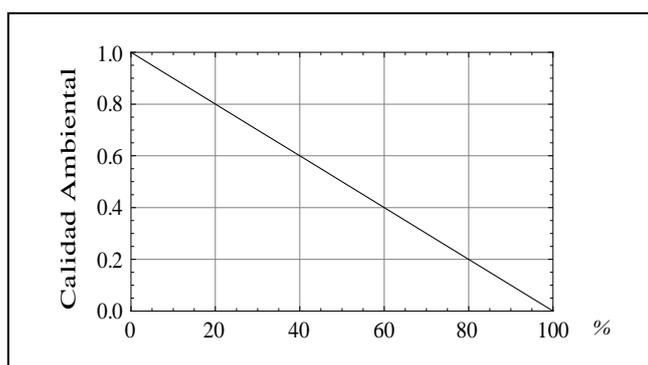


Fig. III.29 Función de transformación del indicador ambiental: *Valor del suelo*