



REDES COMPLEJAS EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL: PROPUESTA METODOLÓGICA

Autores: Liven Fernando Martínez Bernal¹, José Javier Toro Calderón², Carmelo Javier León González³.

1. RESUMEN

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es un proceso que busca determinar de manera anticipada, las consecuencias de un proyecto, obra o actividad (POA) sobre el ambiente. En este sentido es una herramienta para la gestión y control de la calidad ambiental. Para esto se hace uso de metodologías cualitativas, que establecen la importancia de los impactos ambientales a partir de la calificación de atributos. Dichas metodologías tienen dificultades para incorporar la complejidad de los sistemas socio-ecológicos, donde se pretenden desarrollar los POAs, así como también para involucrar al análisis las diferentes relaciones que se presentan entre los impactos directos e indirectos (secundarios, terciarios, etc.)

Estas limitaciones propias de las metodologías convencionales (Leopold, Conesa, Gómez-Orea, etc.) generan resultados inciertos, pudiéndose presentar en la realidad impactos no previstos, o con niveles de importancia diferentes a los previstos (impactos subvalorados o sobrevalorados). En este sentido la EIA mediante el uso de redes complejas busca contribuir a la mejora del proceso de evaluación de impacto ambiental (EIA), mediante la reducción de la incertidumbre, al incorporar elementos de la teoría de los sistemas complejos en las etapas de identificación y valoración de impactos ambientales.

La metodología propuesta determina la importancia de los impactos a través del análisis de las relaciones de causalidad, las cuales al ser analizadas y visualizadas mediante diagramas de redes complejas, evitan el uso de atributos para la calificación del impacto y reducen la subjetividad del evaluador. Una aplicación de la metodología sobre un proyecto de exploración petrolera en la llanura Colombiana, permitió identificar como ventajas de su utilización: 1. la posibilidad de priorizar los impactos ambientales de acuerdo con su capacidad para interactuar con otros impactos (secundarios, terciarios, etc.) y 2. La posibilidad de direccionar los planes de manejo hacia la prevención de los impactos de mayor complejidad, reduciendo por ende la importancia de sus impactos derivados. Otras aplicaciones realizadas con esta metodología han sido el análisis de las problemáticas ambientales de los humedales en la ciudad de Bogotá, y el impacto ambiental del turismo en zonas naturales protegidas.

¹ Candidato a Doctor en Turismo Economía y Gestión (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria; Instituto Universitario de Turismo y Desarrollo Económico Sostenible). Magister en Ambiente y Desarrollo (Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Estudios Ambientales). E-mail: liven.martinez101@alu.ulpgc.es, lfmartinezb@unal.edu.co

² Doctor en seguridad, calidad y optimización de recursos en infraestructuras y su relación medioambiental (Universidad de Granada). Magister en Medio Ambiente y Desarrollo (Universidad Nacional de Colombia; Instituto de Estudios Ambientales). E-mail: jitoroca@unal.edu.co

³ Doctor en economía (Universidad de Las Palmas, Instituto Universitario de Turismo y Desarrollo Económico Sostenible). E-mail: cleon@daea.ulpgc.es



Palabras clave: Evaluación de Impacto Ambiental, Complejidad, Incertidumbre, Sistemas Complejos, Metodología, Modelación.

2. INTRODUCCIÓN

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un proceso para estimar los impactos ambientales significativos generados por proyectos, obras o actividades (POA) de manera previa a su implementación, con el fin de tomar decisiones relacionadas con su viabilidad (Benson, 2003; Jay, Jones, Slinn, y Wood, 2007). Su propósito principal es generar información acerca de los posibles cambios que pueden ocurrir en el ambiente, lo cual la convierte en un instrumento de planificación (Norwegian Ministry of the Environment, 2003; Tennøy, Kværner, y Gjerstad, 2006; Wathern, 1990).

La EIA es conceptuada como un sistema de producción de conocimiento y generación de valores sociales, siendo un instrumento fundamental para promover el desarrollo sostenible (Phillips, 2011; Wilkins, 2003). Al basarse en una evaluación exhaustiva de las actividades planeadas, la EIA puede ser considerada como una herramienta de gestión ambiental (Hollick, 1981; Ortolano y Sheperd, 1995; Samarakoon y Rowan, 2008; Snell y Cowell, 2006; Wathern, 1994; Wood, 1993). No obstante las ventajas que brinda la EIA, su adopción, aplicación y alcance dependen del contexto institucional y político en el que está inmerso (Ortolano, Jenkins, y Abracosa, 1987).

El estudio de impacto ambiental (EsIA) es el componente técnico de la EIA, que brinda el soporte o la información necesaria para tomar las decisiones. Tiene como objetivo central la identificación y valoración de los impactos ambientales y el diseño y ejecución de los Planes de Manejo Ambiental (PMA) para prevenir, mitigar, corregir o compensar estos impactos. Adicionalmente proporciona información valiosa que podría contribuir al abandono o la modificación sustancial de los POA propuestos (Glasson, Therivel, y Chadwick, 2005).

Una preocupación creciente en el desarrollo de los EsIA se relaciona con las incertidumbres o imprecisiones de las metodologías de identificación y evaluación de los impactos ambientales (Chivat, 2016; Leung et al., 2016). Estudios de auditoria muestran que los impactos ambientales reales de los POA difieren significativamente de los impactos previstos o evaluados en los EsIA (Buckley, 1992; Tennøy, Kværner, & Gjerstad, 2006b).

En consecuencia, el grado de significancia o la calificación de la importancia de los impactos pueden ser menor a la real, lo que explica porque algunos impactos no se incluyen en los planes de manejo ambiental o que las medidas correctivas no correspondan con la intensidad de los mismos. Esto evidentemente aumenta el riesgo de deterioro del ambiente en el área de influencia del proyecto (Toro et al., 2013). La incertidumbre en las predicciones es uno de los considerandos importantes cuando se estudia la EIA (Tennøy et al., 2006b).

En este artículo se presenta una metodología para evaluar los impactos ambientales basada en la teoría de redes complejas. Esta metodología contribuye a disminuir la incertidumbre, al determinar la importancia de los impactos a través del análisis de las relaciones de causalidad. Con lo cual se evita el uso de atributos cualitativos para la calificación del impacto y se reduce la subjetividad del evaluador.



En la sección 3 se presenta el concepto de incertidumbre, las fuentes de incertidumbre en la EIA y algunas de las estrategias propuestas para su reducción. En la sección 4 se presenta la metodología para la EIA mediante el uso de redes complejas y se detalla el procedimiento para su aplicación, finalizando con la presentación de los conceptos teóricos que la sustentan. En la sesión 5 se presenta una aplicación de la metodología propuesta con el fin de analizar sus alcances y funcionamiento y comparar los resultados obtenidos con una metodología cualitativa de alto uso en los EsIA. Finalmente en la sección 6 se presentan las conclusiones y se resaltan las ventajas y limitaciones de la metodología.

3. INCERTIDUMBRE EN LA EIA

¿Qué es la incertidumbre? Investigaciones relacionadas con la exactitud de los EsIA han demostrado que en al menos el 50% de los casos estudiados, los impactos ambientales identificados no corresponden con la realidad. Esta falta de certeza o incertidumbre es debida en parte, a que la EIA se hace en un escenario de predicciones sobre los posibles efectos de la interacción entre las acciones del proyecto y el ambiente (Tennøy et al., 2006; Glasson, Therivel, & Chadwick, 2005; Flyvbjerg, Bruzelius, & Rothengatter, 2003; Teigland, 2000; Wood, Dipper, & Jones, 2000; Dipper, Jones, & Wood, 1998; Buckley, 1992).

La imprecisión de la información primaria es otro factor que permite explicar la incertidumbre, ya que a menudo los datos críticos necesarios para hacer los pronósticos consisten en suposiciones sobre el futuro. De esta manera las predicciones que implican vínculos entre supuestos que interactúan, pueden conducir a incertidumbres sustanciales. Además de esto, generalmente se desconocen los efectos acumulativos, los efectos a largo plazo y todos los eventos impredecibles que pueden afectar el proyecto (Tennøy et al., 2006; Flyvbjerg, Holm, & Buhl, 2002; Wachs, 1990).

Otros aspectos que explican la incertidumbre son las limitaciones en el flujo de la información, es decir la comunicación, y el gran número de factores ambientales que deben ser caracterizados y/o valorados de manera cualitativa, sobre la base de juicios humanos. Esto involucra diferentes tipos de incertidumbres asociadas al evaluador, como son la ignorancia, la falta de claridad en los conceptos o la valoración de impactos sobre información errónea o parcializada (Wang, Yang, & Xu, 2006; Tennøy et al., 2006; Flyvbjerg et al., 2003).

Adicionalmente la dinámica de los proyectos incluye cambios no previstos, que conducen a que las predicciones difieran de lo planeado a lo implementado, afectando a las medidas de mitigación formuladas para evitar o reducir los impactos ambientales no deseados, lo cual pone en duda la efectividad de los planes de manejo (De Jongh, 1988; Glasson et al., 2005; Teigland, 2000; Tennøy et al., 2006).

Algunos autores consideran que la incertidumbre se produce por errores en los modelos empleados para realizar las predicciones, la información de referencia, los datos utilizados y los supuestos establecidos. Al respecto De Jongh (1988) señala tres tipos de errores estructurales que pueden ocurrir en los modelos ambientales: 1. La simplificación excesiva de la realidad; 2. La incapacidad para describir los procesos reales de causa y efecto y 3. El uso de un modelo no válido para el problema en cuestión. Estos errores se



incorporan en los EsIA al aplicar modelos no validados en el contexto del proyecto; al asumir que los resultados serán correspondientes con el comportamiento que se presentará en el medio; y al equiparar proyectos similares en diferentes medios.

Las consideraciones subjetivas necesarias para la elaboración de los EsIA, como por ejemplo, las decisiones acerca de qué alternativas evaluar, qué procesos incluir en el modelo, y qué datos y supuestos se deben tener en cuenta para la construcción y uso del modelo, conllevan a que el conocimiento y las ideas de las personas involucradas en el proceso influyan inevitablemente en los resultados, haciendo posible que la información se adapte para que corresponda con lo que se considera aceptable para quien toma la decisión o para que parezca ser la mejor o la única opción (Tennøy et al., 2006a).

En este sentido, Morgan (1998) considera que debido a que el conocimiento del ambiente nunca será suficiente para predecir con precisión los impactos de un proyecto, los evaluadores se ven obligados a decidir de qué manera predecirlos y a definir qué es importante y qué consideraciones se deben tener en cuenta en el proceso con base en sus valores personales. Razón por la cual la posición y los valores morales de los evaluadores condicionan la subjetividad y la incertidumbre de la EIA.

Cuando se plantean estrategias para reducir la incertidumbre en la EIA, varios autores enfatizan en el monitoreo y la post-auditoría. Esto puede contribuir a la mejora del proceso en varios aspectos como la generación de conocimiento a partir de la experiencia, la identificación de los tipos de impacto que tienden a ser inferidos con menor precisión, la mejora gradual de las técnicas de predicción utilizadas, la producción de información de referencia para el futuro y la evaluación del grado de exactitud de la EIA (Bisset & Tomlinson, 1988; Flyvbjerg et al., 2003; Teigland, 2000; Tennøy et al., 2006a; Wood et al., 2000).

Otros factores determinantes para disminuir la incertidumbre pueden ser el uso de información de referencia de mejor calidad, la modelación matemática y el desarrollo de modelos y métodos que profundicen en las relaciones de causalidad y los efectos (Byron, Treweek, Sheate, & Thompson, 2000; De Jongh, 1988; Geneletti, Beinat, Chung, Fabbri, & Scholten, 2003; Teigland, 2000).

4. EIA MEDIANTE EL USO DE REDES COMPLEJAS

Antes de abordar la descripción de la metodología se presentarán los conceptos básicos sobre los cuales se elabora esta propuesta metodológica.

4.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS

Formalmente, una red compleja puede representarse como un gráfico $G = (N, L)$ donde N y L son dos conjuntos, tal que $N \neq \emptyset$ y L es un conjunto de pares de elementos de N . Los elementos de $N \equiv \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ son los nodos (vértices o puntos) de la gráfica G , mientras que los elementos de $L \equiv \{l_1, l_2, \dots, l_K\}$ son los enlaces (aristas o líneas) que unen los nodos. El número de elementos de N y L se denota por N y K , respectivamente, por lo cual una gráfica que representa una red compleja puede denotarse como $G(N, K) = (N, L)$ o simplemente como $G(N, K)$ o $G_{N, K}$, siendo siempre necesario especificar el número de



nodos (tamaño de la gráfica) y enlaces del gráfico (Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, & Hwang, 2006).

Un nodo es generalmente conocido por su orden i en el conjunto de N . En un gráfico no dirigido, cada uno de los enlaces se define por un par de nodos i y j , y se denota como (i, j) o l_{ij} . El enlace se emplea para expresar la incidencia entre los nodos i y j o para unir los nodos. De esta manera a dos nodos unidos por un enlace se les denomina adyacentes o vecinos. En un grafo dirigido, el orden de los dos nodos es importante: l_{ij} representa un enlace de i a j , siendo $l_{ij} \neq l_{ji}$. La forma habitual de representar un gráfico es dibujar un punto para cada nodo y unir dos puntos con una línea, si los dos nodos correspondientes están conectados por un enlace (ibíd).

En estos gráficos no se presentan bucles, es decir, enlaces de un nodo a sí mismo, ni aristas múltiples, es decir, parejas de nodos conectados por más de un enlace, ya que estos elementos no están permitidos por la definición estándar de gráfico dada anteriormente. Un concepto central en la teoría de grafos es el de la accesibilidad de dos nodos diferentes de un gráfico. De hecho, dos nodos que no son adyacentes pueden no obstante ser alcanzables. Un camino del nodo i al nodo j es una secuencia alternante de nodos y aristas (una secuencia de nodos adyacentes) que comienza con i y termina con j . La longitud del camino se define como el número de aristas en la secuencia (ibíd).

Un paseo es un camino en el que no se repiten aristas. Una ruta es un camino en el que ningún nodo es visitado más de una vez. El camino de menor longitud entre dos nodos se conoce como "la ruta más corta" o geodésica. Un ciclo es un camino cerrado, de al menos tres nodos, en los que se no repiten aristas (ibíd).

Se dice que un gráfico está conectado si, para cada par de nodos distintos i y j , hay un camino de i a j , de lo contrario, se denomina no conectado o desconectado. A menudo es útil considerar una representación matricial de un gráfico. Un grafo $G = (N, L)$ puede ser completamente descrito por una matriz de adyacencia (o conectividad) A , la cual es una matriz cuadrada de tamaño $N \times N$ cuya entrada a_{ij} ($i, j = 1, \dots, N$) es igual a 1 cuando el enlace l_{ij} existe, y cero en caso contrario, siendo simétrica para grafos no dirigidos (la relación $l_{ij} = l_{ji}$) y no simétrica cuando las relaciones entre nodos son dirigidas (la relación $l_{ij} \neq l_{ji}$). Por regla general la diagonal de la matriz de adyacencia contiene ceros (Ibíd).

El grado K_i de un nodo i es el número de aristas incidentes con el nodo, y es definido en términos de la matriz de adyacencia A como:

$$K_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Si la gráfica es dirigida, el grado del nodo tiene dos componentes: el número de enlaces salientes (referido como el grado de salida del nodo):

$$K_i^{out} = \sum_j a_{ij} \quad (\text{Ecuación 2})$$

y el número de enlaces entrantes (referido como el grado de entrada del nodo):

$$K_i^{in} = \sum_j a_{ji} \quad (\text{Ecuación 3})$$



El grado total del nodo es definido como:

$$K_i = K_i^{out} + K_i^{in} \text{ (Ecuación 4)}$$

Los conceptos anteriores, corresponden a los conceptos teóricos sobre los cuales se realiza esta propuesta metodológica para la identificación y valoración de impactos ambientales, que busca disminuir la incertidumbre en los EsIA a través del estudio de las relaciones de causalidad y el análisis gráfico empleando la técnica de modelación de sistemas complejos conocida como análisis de redes.

4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EIA MEDIANTE EL USO DE REDES COMPLEJAS

A diferencia de las metodologías de mayor uso, como son la cualitativa y la RIAM, que se basan en una matriz de doble entrada en la que se analizan las actividades del proyecto y el ambiente; la metodología propuesta emplea una matriz de adyacencia en la que se comparten, tanto en las filas como las columnas, las actividades y los impactos ambientales, permitiendo examinar los impactos secundarios, terciarios o de otro nivel. Es decir, aquellos impactos que se generan con posterioridad al impacto directo de la actividad. Mediante este enfoque se busca priorizar los impactos en función de su capacidad para interactuar con otros impactos y orientar los planes de manejo hacia la prevención, corrección y mitigación de los mismos. Esto implica entender el impacto como un agente generador de cambios (al ser causa de impactos secundarios, terciarios, etc.) y no solo como consecuencia de las actividades del proyecto.

Al no emplear atributos para describir y evaluar el impacto ambiental, esta metodología reduce la subjetividad del evaluador y la posibilidad de manipular los resultados, centrándose en responder la pregunta ¿el impacto X es consecuencia directa de Y?, reduciendo las posibilidades de subvalorar un impacto, como puede ocurrir cuando las preguntas a responder son ¿la intensidad del impacto es baja, media, alta, muy alta o total? o ¿la extensión del impacto es puntual, parcial, extensa, total o crítica?, empleadas en la metodología cualitativa.

Esta metodología propone que los resultados de la evaluación puedan ser analizados de manera gráfica, con el fin de facilitar la labor del tomador de decisiones y de quienes requieran consultar los resultados de la evaluación. Al igual que la metodología cualitativa (Conesa, 1996), la EIA mediante el uso de redes complejas contempla las fases de:

- I. Identificación de actividades del proyecto potencialmente impactantes.
- II. Identificación de los factores del medio potencialmente impactados.
- III. Jerarquización de los impactos.
- IV. Valoración de las acciones y los factores ambientales.

No obstante la se distancia de la metodología cualitativa en los siguientes aspectos:

- En la EIA mediante el uso de redes complejas el análisis de la causalidad involucra el estudio de las relaciones actividad-impacto (análisis convencional), así como el análisis impacto-impacto.
- En la EIA mediante el uso de redes complejas la valoración de los impactos no se basa en el cálculo de una función de importancia, determinada mediante la



calificación de atributos, sino por las relaciones de causalidad existentes entre los elementos analizados (actividades e impactos).

- La matriz empleada para la valoración de la importancia potencial (IP) de los impactos es una matriz de adyacencia, cuadrada⁴ y asimétrica⁵, que permite evaluar los impactos de la actividad sobre el medio, así como también los impactos secundarios y terciarios, originados por los impactos directos, que se derivan de la actividad.

Entendiendo estas diferencias a continuación se presentan cada una de las fases propuestas.

Primera fase: identificación de las acciones del proyecto potencialmente impactantes

En esta fase se deben identificar las acciones susceptibles de generar impactos en las etapas de construcción, operación y de ser necesario desmantelamiento y abandono del proyecto (Conesa, 1996). Para la identificación de las acciones, se deben diferenciar los elementos del proyecto de manera estructurada, atendiendo los siguientes aspectos:

- Actividades que modifiquen el uso del suelo por nuevas ocupaciones y/o por desplazamiento de la población
- Actividades que generen emisión de contaminantes a la atmósfera, a las aguas superficiales y subterráneas y/o al suelo
- Actividades derivadas del almacenamiento de residuos dentro del núcleo de la actividad, por el transporte, en vertederos y/o almacenes especiales
- Actividades que impliquen sobreexplotación de materias primas, consumos energéticos y/o consumos de agua
- Actividades que impliquen sub-explotación de recursos agropecuarios y/o faunísticos
- Actividades que actúen sobre el medio biótico generando efectos de emigración, disminución y/o desaparición de especies
- Actividades que den lugar al deterioro del paisaje por cambios en la topografía, el suelo, la vegetación y/o el agua
- Actividades que afecten las infraestructuras
- Actividades que modifiquen el entorno social, económico y cultural
- Actividades que involucren el incumplimiento de la normatividad ambiental vigente.

El resultado de esta fase es un listado de actividades potencialmente impactantes, agrupadas por lo que podrían ser las fases y/o etapas del proyecto.

Segunda fase: Identificación de los factores del medio potencialmente impactados

La segunda fase consiste en identificar los factores ambientales sobre los cuales pueden ocurrir cambios positivos o negativos ocasionados por las acciones del proyecto. Para facilitar la identificación de los impactos se propone emplear una lista de chequeo de

⁴ El número de filas es igual al número de columnas

⁵ La relación entre los elemento X_i y Y_i es diferente a la relación entre Y_i y X_i



componentes y factores ambientales (Tabla 3). El resultado de esta fase es un listado de factores ambientales susceptibles de ser impactados, agrupados por el medio y componente ambiental al que pertenecen.

Tabla 3: **Componentes y Factores Ambientales**

Medio	Componente Ambiental	Factores Ambientales
Físico	Geoformas	Geología, morfología, morfodinámica y morfoestructura
	Paisaje	Visibilidad, estructura, fisionomía, diversidad de unidades y estética característica
	Suelo	Uso, textura, estructura y fertilidad
	Agua	Hidromorfología, caudal, volumen de agua, calidad físico-química y bacteriológica, patron de drenaje, régimen hidrológico y nivel freático
	Atmósfera	Calidad del aire, temperatura, precipitación, humedad, viento, radiación, clima, microclimas y ruido
Biótico	Flora	Coberturas vegetales, composición vegetal, distribución de flora y diversidad vegetal
	Fauna	Diversidad fauna, cadenas alimenticias, hábitat, población e hidrofauna
Social	Comunidad	Migraciones, ocupación del territorio, grupos humanos, valores ciudadanos, participación ciudadana y bienestar social.
	Infraestructura	Transporte, salud, educación, servicios sociales y servicios públicos.
	Cultura	Valores y prácticas culturales, uso y manejo del entorno, marco normativo, arqueología.
	Economía	Estructura de la propiedad, sistemas productivos, sistemas extractivos, tecnificación, mercados, comercio y empleo



Elaborado a partir de Conesa (1996) y Garmendia, Salvador, Crespo, & Garmendia (2005)

Tercera fase: Jerarquización de los impactos

La tercera fase busca jerarquizar los impactos ambientales de acuerdo con su importancia potencial (IP), entendida esta característica como la capacidad para interactuar con otros impactos, con el fin de enfocar los planes de manejo hacia la prevención, corrección o mitigación de los impactos significativos. Esta fase se compone de tres etapas:

- I. Identificación de los impactos ambientales potenciales
- II. Elaboración de la matriz de adyacencia
- III. Valoración del impacto

Etapa I: Identificación de los impactos ambientales potenciales

En esta etapa se propone emplear la matriz de doble entrada empleada en la metodología cualitativa (Tabla 4) para identificar los impactos ambientales. Para esto se debe ubicar en la primera y segunda columna los componentes y factores ambientales sobre los cuales se pueden generar impactos, y en las dos primeras filas las etapas y actividades del proyecto potencialmente impactantes. Posteriormente se debe determinar en cada celda si la actividad interactúa con el factor ambiental y en caso de que se presente dicha interacción, identificar el tipo de impacto ya sea positivo o negativo.

El resultado de esta etapa por consiguiente es el la identificación o nombramiento de los impactos ambientales. A manera de ejemplo se muestra en la tabla 4, como al interactuar la actividad A_1 con el factor ambiental F_1 se presenta el impacto ambiental I_1 . De la misma manera se puede interpretar que la actividad A_1 no interactúa con los factores F_2 , F_3 , F_4 y F_n por lo que en estas celdas no se ha identificado ningún impacto.

Tabla 4: **Matriz de identificación de impactos**

Componente Ambiental	Factor Ambiental	Actividades del Proyecto				
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_n
C_1	F_1	$F_1 \times A_1 = (I_1)$				
	F_2		$F_2 \times A_2 = (I_2)$			
	F_3			$F_3 \times A_3 = (I_3)$		
	F_4				$F_4 \times A_4 = (I_4)$	



	F_n					$F_n \times A_n = (I_n)$
--	-------	--	--	--	--	--------------------------

Elaborado a partir de Conesa (1996)

Etapa II: Elaboración de la matriz de adyacencia

Una vez se han identificado todas las actividades del proyecto y los impactos potenciales en la matriz de identificación de impactos (Tabla 4), se procede a diligenciar la matriz de adyacencia (Tabla 5), la cual será empleada posteriormente para la construcción de un gráfico que represente de manera simultánea, las relaciones de causalidad existentes entre las actividades del proyecto y los impactos ambientales, haciendo uso de líneas; y la significancia de las relaciones, mediante el tamaño y color de los elementos o nodos.

Como se observa en la tabla 5, la matriz de adyacencia tiene como característica principal que posee el mismo número de filas y de columnas, razón por la cual se denomina cuadrada, y que en ambas se encuentran las actividades e impactos del proyecto (Boccaletti et al., 2006). Esto obedece a que la matriz de adyacencia analiza la relación de causalidad que hay entre todos los elementos, a diferencia de las matrices empleadas por las metodologías convencionales como la de Leopold, la cualitativa y la RAM, en las que solo es posible analizar las relaciones entre actividades del proyecto y los impactos ambientales.

Para diligenciar la matriz de adyacencia se debe identificar las columnas y filas con un código que represente a cada actividad e impacto identificado en la tabla 4 y posteriormente, en cada una de las casillas, señalar si existe una relación de causalidad directa⁶ entre el elemento de la columna de la izquierda y el elemento ubicado en la fila superior a la derecha. Para realizar este paso se recomienda realizar la siguiente pregunta: ¿es X consecuencia directa de Y? siendo X el elemento de la fila superior y Y el elemento de la columna de la izquierda. Si la respuesta es “Sí” se debe asignar un 1 y si es “No” un 0 en la celda que representa la relación analizada.

Tabla 5: Matriz de adyacencia

Efectos Causas	A_1	A_2	A_3	A_n	I_1	I_2	I_3	I_4	I_n
A_1	0				$A_1 \rightarrow I_1$				$A_1 \rightarrow I_n$
A_2		0							

⁶ Hace referencia a una relación donde el efecto o resultado es atribuible totalmente a la causa, sin que intervenga una circunstancia intermedia (Mac Mahon, Pugh, & Temoche, 1965).



A_3			0						
A_n				0					
I_1	$I_1 \rightarrow A_1$				0				
I_2						0			
I_3							0		
I_4								0	
I_n	$I_n \rightarrow A_1$								0

Fuente: Elaboración propia⁷

Para ilustrar el diligenciamiento de la matriz de adyacencia se presenta el siguiente ejemplo:

En un proyecto de infraestructura que consiste en la construcción de una carretera paralela a un río, una de las actividades identificada como potencialmente impactante es la remoción de la cobertura vegetal, ya que se tiene el conocimiento de que parte del material removido puede depositarse en el río aumentando la concentración de materia orgánica. Adicionalmente se conoce que el aumento de materia orgánica en el agua, genera el aumento de la demanda biológica de oxígeno (DBO), que a su vez induce una disminución del oxígeno disuelto y una reducción de la producción primaria, lo cual afecta la cantidad de alimento disponible para los peces que con el tiempo pueden verse diezmados hasta el punto de afectar la cantidad de alimento disponible para una población de pescadores aguas abajo.

En este caso

- A_1 = Remoción de la cobertura vegetal
- I_1 = Aumento de la concentración de materia orgánica
- I_2 = Aumento de la DBO
- I_3 = Disminución del oxígeno disuelto
- I_4 = Reducción de la producción primaria
- I_5 = Disminución de la población de peces
- I_6 = Disminución en la disponibilidad de alimento para la comunidad

La matriz de adyacencia para este ejemplo se muestra en la tabla 6.

⁷ A corresponde con las actividades e I con los impactos identificados



Tabla 6: Matriz de adyacencia para el ejemplo

Efectos Causas	A ₁	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆
A ₁	0	1	0	0	0	0	0
I ₁	0	0	1	1	0	0	0
I ₂	0	0	0	1	0	0	0
I ₃	0	0	0	0	1	1	0
I ₄	0	0	0	0	0	1	0
I ₅	0	0	0	0	0	0	1
I ₆	0	0	0	0	0	0	0

Como se observa en la tabla 6, la actividad A₁ genera el impacto I₁, que a su vez genera el impacto I₂, razón por la cual se han diligenciado con 1 las celdas correspondientes. Sin embargo el impacto I₁ no es causa de la actividad A₁ motivo por el cual en esta celda se ha registrado un 0. Por su parte la fila correspondiente al impacto I₆ ha sido completamente diligenciada con ceros al no ser éste causa directa de ningún otro impacto incluido en el análisis. El hecho de que las relaciones causales tengan un sentido hace que la matriz adquiera la característica de ser asimétrica.

La matriz de adyacencia es similar, en cuanto a su funcionalidad y estructura, a la matriz de Frederic Vester, la cual ha sido empleada para jerarquizar problemas ambientales, determinar sus causas y consecuencias, y para evaluar el impacto socio-ambiental de proyectos *ex-post* (Restrepo & Cuadros, 2013; Tobasura & Sepulveda, 1997). Sin embargo se diferencia de ésta en su diligenciamiento ya que en dicha matriz se emplea 0 para indicar la inexistencia de la relación de causalidad, 1 cuando se presenta una relación de causalidad indirecta, 2 cuando existe una relación de causalidad directa débil y 3 cuando hay una relación de causalidad directa fuerte.

Es importante señalar que esta etapa debe ser realizarla por un equipo profesional interdisciplinario competente para emitir conceptos sobre las posibles afectaciones que podrían darse en cada uno los componentes ambientales por la ejecución del proyecto, involucrando a la comunidad afectada/beneficiada de manera que se incorpore en el análisis la opinión de la ciudadanía, dando aplicación al concepto de “pluralidad de perspectivas legítimas” propuesta por la ciencia post-normal (Funtowicz & De Marchi, 2000; Funtowicz & Ravetz, 2003; Ravetz, 1999).

Etapa III: Valoración del impacto



Una vez diligenciada la matriz de adyacencia (Tabla 5), se procede al análisis de las relaciones entre las actividades y los impactos, con el fin de jerarquizar éstos últimos de acuerdo con su IP.

Para calcular la IP se deben sumar las filas y las columnas de la matriz de adyacencia. El resultado de las filas se denomina **grado de salida** y significa la cantidad de ocasiones en que la actividad o impacto es causa de otros impactos, mientras que el resultado de las columnas se denomina **grado de entrada** y corresponde con la cantidad de veces en que la actividad o impacto es consecuencia de otra actividad u otros impactos. La IP de cada impacto será el resultado de sumar su grado de entrada y de salida, es decir su **grado total** (Ecuación 4).

En la tabla 7 se presentan los resultados del grado de entrada y salida para las actividades e impactos del ejemplo anterior.

Tabla 7: Valoración de impactos

Efectos Causas	Efectos							Grado de salida
	A ₁	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	
A ₁	0	1	0	0	0	0	0	1
I ₁	0	0	1	1	0	0	0	2
I ₂	0	0	0	1	0	0	0	1
I ₃	0	0	0	0	1	1	0	2
I ₄	0	0	0	0	0	1	0	1
I ₅	0	0	0	0	0	0	1	1
I ₆	0	0	0	0	0	0	0	0
Grado de entrada	0	1	1	2	1	2	1	8

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 7, el grado de salida del impacto I₁ indica que es causa de 2 impactos (I₂ e I₃) mientras que su grado de entrada indica que es consecuencia de una actividad (A₁). En este caso el grado total o IP de I₁ es igual a 3.

Para determinar cuáles son los impactos de mayor significancia se propone organizar los resultados del grado total y definir su IP por cuartiles (dividiendo el rango obtenido en cuatro). Asignando la categoría de irrelevante al primer cuartil, moderado al segundo,



severo al tercero y crítico al último cuartil. Con este propósito se sugiere el uso de las tablas 8 y 9, las cuales han sido diligenciadas con información hipotética a manera de ejemplo.

Tabla 8: **Significancia de los impactos**

Impacto	Grado de salida	Grado de entrada	Grado total (IP)	Cuartil al que pertenece	Significancia
I ₁	37	15	52	4	Critico
I ₂	26	2	28	3	Severo
I ₃	14	6	20	2	Moderado
I ₄	3	12	15	1	Irrelevante
I ₅	0	4	4	1	Irrelevante

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: **Cuartiles**

	Valores
Grado total mínimo (G_{\min})	4
Grado total máximo (G_{\max})	52
Rango ($G_{\max} - G_{\min}$)	48
Amplitud del cuartil	12
1 cuartil	4-16
2 cuartil	16-28
3 cuartil	28-40
4 cuartil	40-52



Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 9, el rango corresponde a la diferencia entre el valor máximo y mínimo obtenido para el grado total, este valor al ser dividido por 4 proporciona la amplitud del cuartil, que a su vez es empleado para determinar los rangos de los cuartiles. En los casos en los que un resultado se encuentre en un punto que pertenece a 2 cuartiles (como por ejemplo I_2) se sugiere asignar la categoría de mayor significancia a ese impacto.

Cuarta fase: valoración de las acciones y los factores ambientales

Para la última fase se propone realizar el análisis del grado por factor ambiental y etapa del proyecto, de manera que se agreguen las relaciones de causalidad, determinando la importancia de los impactos a una mayor escala, con el fin de establecer las etapas en las que se deben focalizar las medidas del plan de manejo y los factores ambientales más susceptibles de degradación.

Con este fin se plantea sumar los resultados de la matriz de adyacencia para todas las actividades pertenecientes a la misma etapa del proyecto, y todos los impactos que podrían presentarse sobre un mismo componente ambiental.

Resultados gráficos de la metodología

La descripción anterior explica cómo se obtienen los resultados numéricos de la evaluación, no obstante, como se mencionó al inicio de este capítulo la EIA mediante el uso de redes complejas propone como resultado un componente gráfico que permita diferenciar las actividades del proyecto, los impactos ambientales y su significancia, analizada desde dos perspectivas: 1. El de la relación “ser causa”; y 2. El de la relación “ser consecuencia”, con el propósito de enfocar las medidas del plan de manejo hacia la prevención, corrección y mitigación de las causas de alteración del ambiente. Con este objetivo se sugiere el uso del software Ucinet, que permite el tratamiento gráfico de la matriz de adyacencia y la obtención del resultado propuesto.

5. APLICACIÓN DE LA EIA MEDIANTE EL USO DE REDES COMPLEJAS

En este capítulo se presenta una aplicación de metodología propuesta, con el objetivo de ilustrar su uso y determinar su alcance y limitaciones. En este ejemplo se han priorizado los impactos ambientales haciendo uso de la medida grado, empleada para señalar el número de relaciones que un elemento o nodo posee con otros, desde dos perspectivas: 1. La de la relación “ser causa” y 2. La de la relación “ser consecuencia”. Los resultados obtenidos en esta aplicación se presentan a continuación.

5.1. INFORMACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto sobre el cual se efectuó la aplicación tuvo por objeto la exploración de hidrocarburos. Se localizó en los municipios de Villanueva y Barranca de Upía, en los departamentos de Casanare y Meta, en la región de la Orinoquia colombiana. En la tabla 10 se describen las etapas, fases y actividades del proyecto, así como el código asignado a cada una de estas.



5.2. IMPACTOS AMBIENTALES IDENTIFICADOS

Los impactos ambientales identificados para el proyecto se presentan en la tabla 11, para facilitar la comparación entre los resultados de la metodología propuesta y la empleada en el EsIA presentado por el proponente del proyecto no se incluyeron impactos adicionales.

Tabla 10: **Actividades del proyecto**

FASE	NOMBRE	CÓD.
Preparación del área	Topografía y diseños geotécnico-ambientales definitivos	A-01
	Compra de tierras y/o pagos de servidumbre	A-02
	Contratación de personal y bienes y servicios	A-03
Adecuación y construcción de vías, locaciones y facilidades de producción	Localización y replanteo	A-04
	Adecuaciones de vías de acceso	A-05
	Transporte de personal, equipos, maquinaria y materiales	A-06
	Mantenimiento preventivo de maquinaria, equipos y vehículos	A-07
	Funcionamiento del campamento temporal	A-08
	Remoción de cobertura vegetal y descapote	A-09
	Movimiento de tierras (cortes y rellenos)	A-10
	Cruce de drenajes	A-11
	Construcción obras civiles, geotécnicas y ambientales	A-12
Perforación	Transporte de personal, equipos y maquinaria	A-13
	Mantenimiento preventivo de maquinaria y vehículos	A-14
	Funcionamiento de campamento	A-15
	Captación de agua	A-16



FASE	NOMBRE	CÓD.
	Disposición de aguas residuales tratadas	A-17
	Disposición de residuos sólidos	A-18
	Manejo de cortes y lodos	A-19
	Funcionamiento del taladro y generadores eléctricos	A-20
	Operación teas horizontales	A-21
Pruebas de producción	Mantenimiento preventivo de maquinaria y vehículos	A-22
	Funcionamiento de campamento	A-23
	Captación de agua	A-24
	Disposición de aguas residuales tratadas	A-25
	Disposición de residuos sólidos	A-26
	Funcionamiento generadores eléctricos	A-27
	Operación teas verticales	A-28
	Compra de tierras y/o pagos de servidumbre	A-29
Instalación y operación de líneas de flujo	Movilización de equipos y tubería	A-30
	Remoción de cobertura vegetal	A-31
	Apertura y conformación del derecho de vía	A-32
	Acopio, tendido y doblado de tubería	A-33
	Cruce de drenajes	A-34
	Cruces de vías	A-35
	Captación de agua para prueba hidrostática	A-36
	Disposición de agua para prueba hidrostática	A-37



FASE	NOMBRE	CÓD.
	Construcción de obras geotécnicas y ambientales	A-38
	Reconformación del derecho de vía	A-39
	Transporte de hidrocarburos en carro tanque	A-40
Gestión social para el abandono	Gestión social para el abandono	A-41
Mantenimiento vial (condiciones adecuadas para plan de abandono)	Revisión del estado actual de las vías	A-42
	Reconformación de sectores en mal estado	A-43
	Limpieza de cunetas y alcantarillas	A-44
Retiro de equipos e infraestructura	Desarme, retiro y traslado de equipos	A-45
	Demolición de estructuras	A-46
	Abandono líneas de flujo	A-47
Reconformación del terreno de áreas operativas	Manejo de residuos	A-48
	Clausura de piscinas	A-49
	Compactación y conformación de áreas	A-50
Cierre definitivo del área	Revegetalización	A-51
	Limpieza final del área	A-52
	Abandono definitivo de las áreas operativas	A-53

Tabla 11: Impactos ambientales del proyecto

MEDIO	COMPONENTE	NOMBRE DEL IMPACTO	CÓD.
Geoesférico	Geotecnia	Activación de procesos de socavación en	I-01



MEDIO	COMPONENTE	NOMBRE DEL IMPACTO	CÓD.
		márgenes de drenajes	
		Activación de procesos erosivos	I-02
	Paisaje	Cambio en la percepción paisajística (cambios cromáticos o presencia de elementos extraños)	I-03
	Geomorfología	Modificación en la forma del terreno	I-04
	Suelos	Cambio en la estructura del suelo	I-05
		Cambio en las características fisicoquímicas del suelo	I-06
		Cambio en el uso del suelo	I-07
Hídrico	Hidrología	Cambio en el patrón de drenaje superficial	I-08
		Alteración del caudal superficial	I-09
		Cambio en las características fisicoquímicas y/o bacteriológicas	I-10
	Hidrogeología	Cambio en las características fisicoquímicas y/o bacteriológicas	I-11
		Cambio de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo	I-12
Atmosférico	Calidad del aire	Alteración de la concentración de gases	I-13
		Alteración en la concentración de material particulado	I-14
		Alteración en los niveles de radiación térmica	I-15
		Alteración de los niveles de presión sonora	I-16
Ecosistema terrestre	Vegetación	Cambio en la composición florística y estructura de la unidad de cobertura vegetal	I-17



MEDIO	COMPONENTE	NOMBRE DEL IMPACTO	CÓD.
	Fauna	Cambio en las composición de la fauna	I-18
Ecosistema acuático	Hábitat	Cambio en la composición y estructura de la comunidad hidrobiológica	I-19
Demografía/ población	Dinámica de la población	Cambio en la dinámica de la población	I-20
		Reubicación de la población	I-21
Dimensión económica	Mercado laboral	Cambio en la dinámica de ocupación laboral	I-22
	Tenencia de la tierra	Cambio en el valor de la tierra	I-23
		Cambio en el uso del suelo	I-24
		Cambio en la estructura de la propiedad de la tierra	I-25
	Actividades económicas	Cambio en actividades económicas	I-26
		Cambio en la oferta/demanda de bienes y servicios locales	I-27
		Cambio en la infraestructura socioeconómica	I-28
		Especulación con precios de bienes y servicios	I-29
Dimensión espacial	Servicios públicos y sociales	Cambio en la oferta/demanda de servicios públicos y/o sociales	I-30
		Cambio en la accidentalidad vial	I-31
Dimensión político-organizativa	Presencia institucional y organización comunitaria	Cambio en la capacidad de gestión de la administración municipal	I-32
		Presencia de nuevos actores en el escenario local y regional	I-33
		Cambio en la capacidad de gestión de la comunidad	I-34



MEDIO	COMPONENTE	NOMBRE DEL IMPACTO	CÓD.
Dimensión cultural	Estrategias adaptativas y culturales	Generación de expectativas	I-35
		Generación de conflictos	I-36
		Cambio en ámbito socio-cultural	I-37
	Aspectos arqueológicos	Afectación del patrimonio arqueológico	I-38

5.3. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

A continuación se presentan los resultados gráficos y numéricos obtenidos para los impactos ambientales del proyecto seleccionado, discriminando su significancia por el grado de entrada y de salida. Así como su análisis comparativo.

Análisis de significancia de los impactos por el grado de entrada

La aplicación del análisis del grado de entrada permitió establecer la significancia de los 38 impactos identificados, 8 bajo la categoría de irrelevante, 25 moderados, 4 severos y 1 crítico. La tabla 12 muestra los valores numéricos obtenidos, organizados de manera ascendente. El diagrama de redes resultante se presenta en la figura 1.

Tabla 12: **Significancia de los impactos ambientales** por su grado de entrada.

Nodo	Descripción	Grado de entrada	Significancia
I-01	Activación de procesos de socavación en márgenes de drenajes	5	Irrelevante
I-02	Activación de Procesos Erosivos	27	Moderado
I-03	Cambio en la percepción paisajística	37	Severo
I-04	Modificación en la forma del terreno	12	Irrelevante
I-05	Cambio en la estructura del suelo	21	Moderado
I-06	Cambio en las características fisicoquímicas del suelo	28	Moderado
I-07	Cambio en el uso del suelo	35	Severo
I-08	Cambio en el patrón de drenaje superficial	6	Irrelevante
I-09	Alteración del caudal superficial	21	Moderado
I-10	Cambio en las características fisicoquímicas y/o bacteriológicas	22	Moderado
I-11	Cambio en las características fisicoquímicas y/o bacteriológicas	15	Moderado
I-12	Cambio de la disponibilidad del recurso hídrico	11	Irrelevante



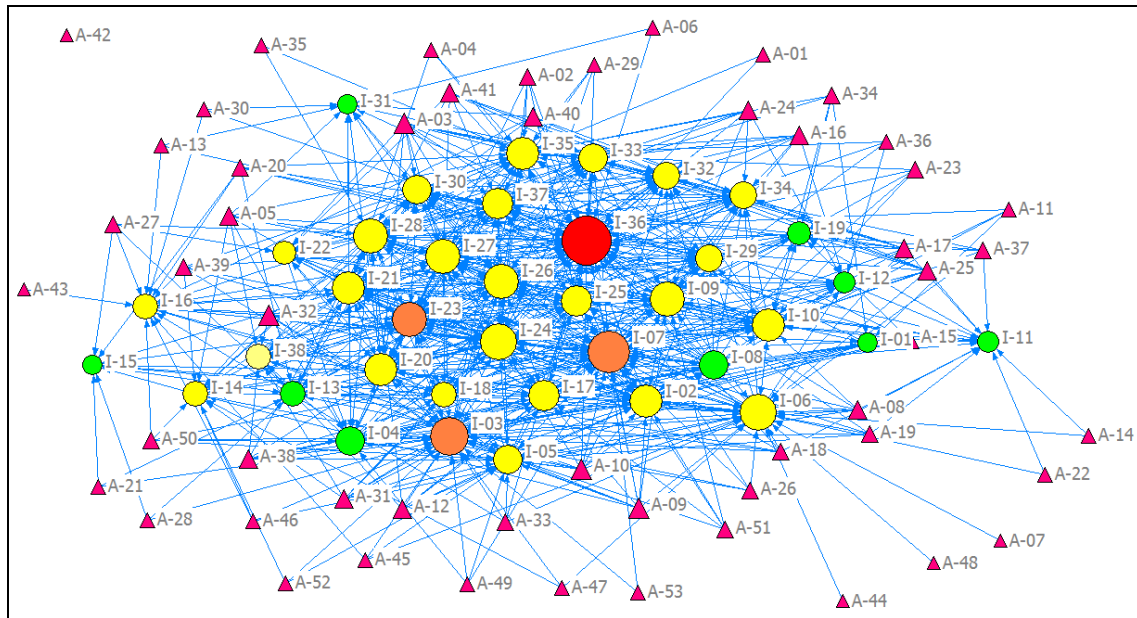
Nodo	Descripción	Grado de entrada	Significancia
	subterráneo		
I-13	Alteración de la concentración de gases	12	Irrelevante
I-14	Alteración en la concentración de material particulado	17	Moderado
I-15	Alteración en los niveles de radiación térmica	8	Irrelevante
I-16	Alteración de los niveles de presión sonora	18	Moderado
I-17	Cambio en la composición florística y estructura de la unidad de cobertura vegetal	22	Moderado
I-18	Cambio en las composición de la fauna	20	Moderado
I-19	Cambio en la composición y estructura de la comunidad hidrobiológica	11	Irrelevante
I-20	Cambio en la Dinámica de la población	23	Moderado
I-21	Reubicación de la Población	28	Moderado
I-22	Cambio en la dinámica de ocupación Laboral	18	Moderado
I-23	Cambio en el valor de la tierra	34	Severo
I-24	Cambio en el uso del suelo (Tenencia de tierra)	28	Moderado
I-25	Cambio en la estructura de la propiedad de la tierra	19	Moderado
I-26	Cambio en actividades económicas	24	Moderado
I-27	Cambio en la oferta/demanda de bienes y servicios locales	28	Moderado
I-28	Cambio en la infraestructura socioeconómica	23	Moderado
I-29	Especulación con precios de bienes y servicios	22	Moderado
I-30	Cambio en la oferta/demanda de servicios públicos y/o sociales	25	Moderado
I-31	Cambio en la accidentalidad vial	12	Irrelevante
I-32	Cambio en la capacidad de gestión de la administración municipal	25	Moderado
I-33	Presencia de nuevos actores en el escenario local y regional	20	Moderado
I-34	Cambio en la capacidad de gestión de la Comunidad	24	Moderado
I-35	Generación de expectativas	31	Severo
I-36	Generación de conflictos	60	Critico
I-37	Cambio en ámbito socio-cultural	28	Moderado
I-38	Afectación del Patrimonio Arqueológico	16	Moderado

En la figura 1 es posible observar cómo se relacionan las actividades con los impactos, y los impactos entre sí. Hacia el exterior se ubican los nodos (actividades e impactos) con menor número de relaciones, mientras que en el interior se ubican los nodos con un alto número de relaciones. El tamaño de símbolos refleja el grado total del elemento, mientras que el color expresa la importancia potencial, siendo rojo crítico, naranja severo, amarillo



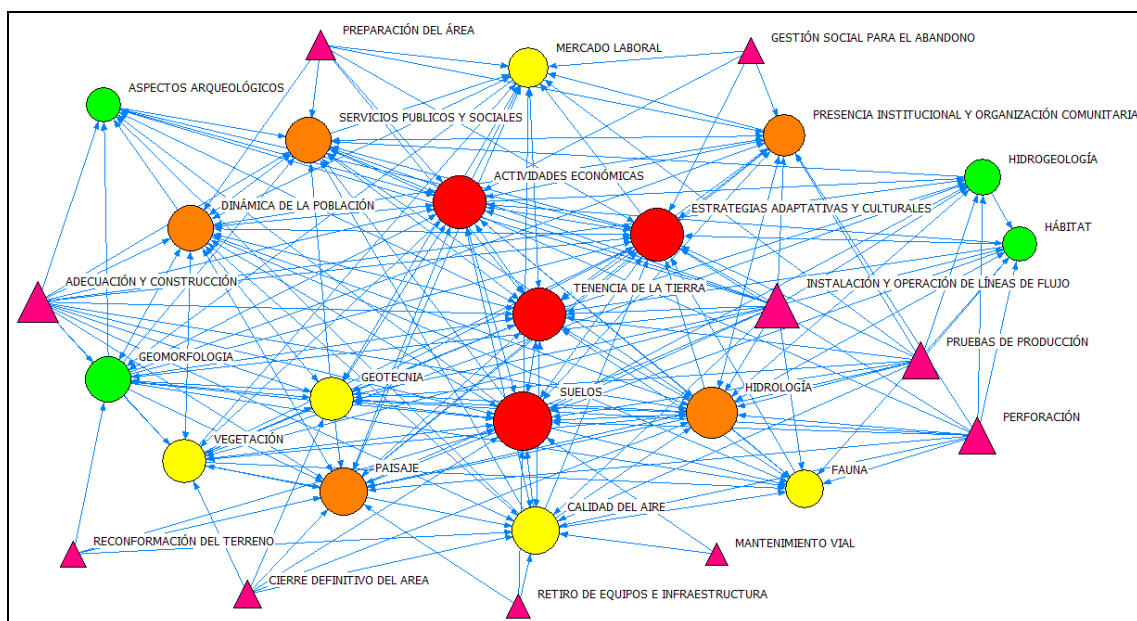
moderado y verde irrelevante. Las actividades se muestran en color rosado ya que no poseen un grado de entrada, es decir no son consecuencia de otro elemento.

Figura 1. Resultado del analisis de grado de entrada para el proyecto.



Al aplicar el procedimiento de colapso por atributos se puede apreciar el grado de afectación para cada factor ambiental, estos se resultados se presentan en la figura 2. Como puede observarse en esta gráfica los factores ambientales más afectados son las estrategias adaptativas y culturales (donde se incluye el impacto de generación de conflictos), las actividades económicas, la tenencia de la tierra y los suelos.

Figura 2. Resultado del analisis de grado de entrada colapsado por atributos.





Análisis de la significancia de los impactos por el grado de salida

En cuanto al análisis de la importancia de las actividades y los impactos por su grado de salida la metodología propuesta permitió establecer que las actividades con mayor importancia son: las adecuaciones de vías de acceso, la disposición de aguas residuales tratadas, construcción de obras geotécnicas y ambientales, la disposición de aguas residuales tratadas, la remoción de cobertura vegetal, la remoción de cobertura vegetal y descapote, la contratación de personal y bienes y servicios, los movimiento de tierras (cortes y rellenos) y la apertura y conformación del derecho de vía.

Por su parte los impactos con mayor relevancia como agentes causales de otros impactos son el cambio en el uso del suelo, el cambio en el patrón de drenaje superficial, el cambio en la infraestructura socioeconómica, el cambio en la oferta/demanda de bienes y servicios locales, el cambio en el uso del suelo (tenencia de la tierra), el cambio en actividades económicas, el cambio en la dinámica de la población y la reubicación de la población.

Los impactos anteriormente mencionados deberían por ende ser manejados mediante medidas que posibiliten su eliminación (preventivas) o la disminución de sus efectos (medidas correctivas y mitigatorias), ya que potencializan la aparición de otros impactos. Los resultados del análisis del grado de salida son mostrados en la tabla 13. El diagrama de redes resultante de este análisis se presenta en la figura 3.

Tabla 13: **Significancia de los impactos** por su grado de salida.

Nodo	Descripción	Grado de salida	Significancia
I-01	Activación de procesos de socavación en márgenes de drenajes	7	Irrelevante
I-02	Activación de procesos erosivos	17	Severo
I-03	Cambio en la percepción paisajística (cambios cromáticos o presencia de elementos extraños)	13	Moderado
I-04	Modificación en la forma del terreno	19	Severo
I-05	Cambio en la estructura del suelo	10	Moderado
I-06	Cambio en las características fisicoquímicas del suelo	16	Severo
I-07	Cambio en el uso del suelo	25	Critico
I-08	Cambio en el patrón de drenaje superficial	25	Critico
I-09	Alteración del caudal superficial	21	Severo
I-10	Cambio en las características fisicoquímicas y/o bacteriológicas	18	Severo
I-11	Cambio en las características fisicoquímicas y/o bacteriológicas	2	Irrelevante
I-12	Cambio de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo	4	Irrelevante
I-13	Alteración de la concentración de gases	14	Moderado
I-14	Alteración en la concentración de material particulado	6	Irrelevante



Nodo	Descripción	Grado de salida	Significancia
I-15	Alteración en los niveles de radiación térmica	5	Irrelevante
I-16	Alteración de los niveles de presión sonora	3	Irrelevante
I-17	Cambio en la composición florística y estructura de la unidad de cobertura vegetal	20	Severo
I-18	Cambio en las composición de la fauna	2	Irrelevante
I-19	Cambio en la composición y estructura de la comunidad hidrobiológica	9	Moderado
I-20	Cambio en la dinámica de la población	31	Critico
I-21	Reubicación de la población	31	Critico
I-22	Cambio en la dinámica de ocupación laboral	5	Irrelevante
I-23	Cambio en el valor de la tierra	17	Severo
I-24	Cambio en el uso del suelo (tenencia de la tierra)	29	Critico
I-25	Cambio en la estructura de la propiedad de la tierra	22	Severo
I-26	Cambio en actividades económicas	30	Critico
I-27	Cambio en la oferta/demanda de bienes y servicios locales	26	Critico
I-28	Cambio en la infraestructura socioeconómica	25	Critico
I-29	Especulación con precios de bienes y servicios	13	Moderado
I-30	Cambio en la oferta/demanda de servicios públicos y/o sociales	15	Moderado
I-31	Cambio en la accidentalidad vial	1	Irrelevante
I-32	Cambio en la capacidad de gestión de la administración municipal	4	Irrelevante
I-33	Presencia de nuevos actores en el escenario local y regional	20	Severo
I-34	Cambio en la capacidad de gestión de la comunidad	5	Irrelevante
I-35	Generación de expectativas	10	Moderado
I-36	Generación de conflictos	5	Irrelevante
I-37	Cambio en ámbito socio-cultural	17	Severo
I-38	Afectación del patrimonio arqueológico	7	Irrelevante

Como se observa en la figura 3, las actividades responsables del mayor número de impactos ambientales se ubican hacia el interior de la red, mientras que las actividades con pocas relaciones causales se encuentran hacia el perímetro. En el centro se concentran los elementos con mayor peso, desde el punto de vista de la causalidad, brindándole al observador la posibilidad de comprender la magnitud de cada elemento como agente modificador del ambiente.

Un resultado relevante de este análisis es que impactos que antes se categorizaron como críticos por el uso del grado de entrada, ahora son irrelevantes, por ejemplo la generación de conflictos I-36, lo cual se explica porque el hecho de que muchos factores pueden



generar conflicto, pero el conflicto en si no es una causa significativa para la afectación de otros componentes ambientales, como si lo puede ser la reubicación de la población.

Al aplicar el procedimiento de colapso por atributos se puede apreciar el potencial de afectación para fase del proyecto y los impactos asociados a cada factor ambiental, estos se resultados se muestran en la figura 4.

Figura 3. Resultado del analisis de grado de salida para el proyecto “Perforación exploratoria de hidrocarburos - Área de Interés Llanos 31”

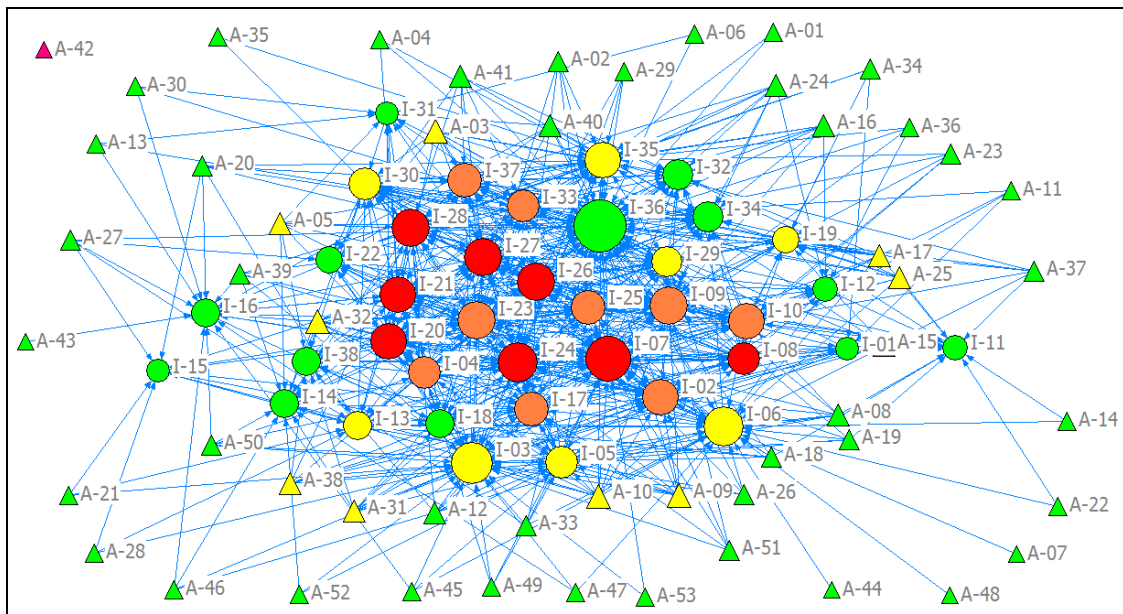
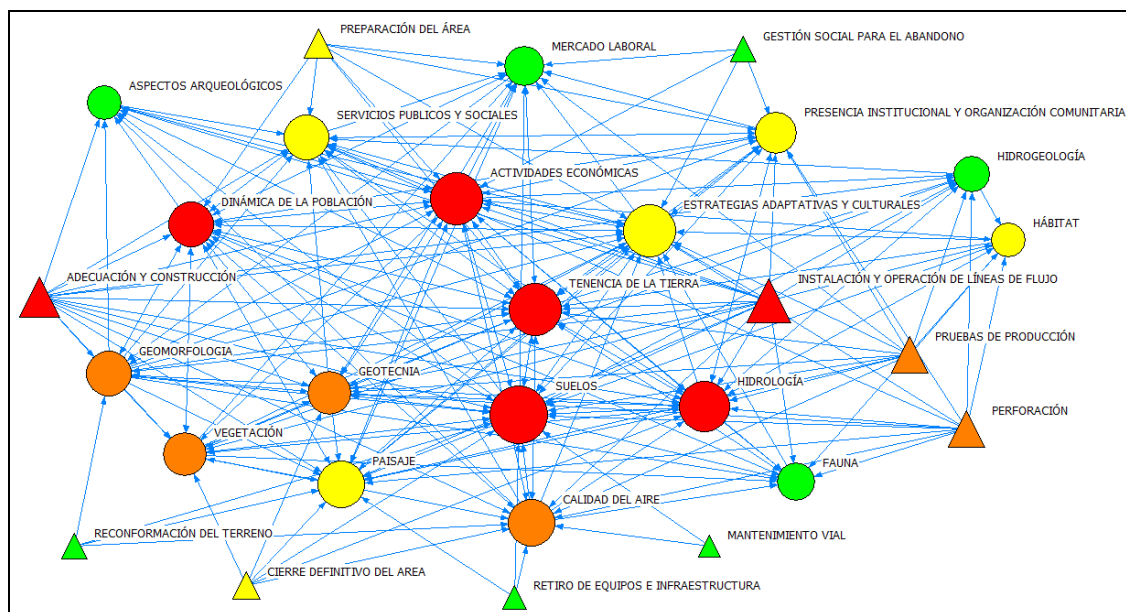


Figura 4. Resultado del analisis de grado de salida colapsado por atributos



Como puede apreciarse en la figura 3 las actividades con mayor potencial de afectación son la adecuación y construcción, la instalación y operación de las líneas de flujo, la perforación y las pruebas de producción. De los factores ambientales se destacan como posibles generadores de impactos la tenencia de la tierra (donde se incluyen el cambio en el valor de la tierra, el uso del suelo y la estructura de la propiedad), las actividades económicas y la dinámica de la población, todas relacionadas con el componente social.

La facilidad para comprender la gran cantidad de información contenida en el gráfico, es una de las mayores ventajas de la metodología propuesta, frente al análisis matricial de la metodología cualitativa. De esta manera las figuras 1, 2, 3 y 4 constituyen el principal resultado de la metodología de EIA mediante el uso de redes complejas, convirtiéndose en herramientas fundamentales para la estructuración de los PMA.

Comparación de los resultados de la EIA mediante el uso de redes complejas y la metodología cualitativa

Una de las principales limitaciones para realizar la comparación de estos resultados es que en el análisis matricial de la metodología cualitativa, un mismo impacto puede ser evaluado para diferentes actividades, recibiendo a su vez diferentes categorías que pueden ser positivas o negativas. Lo cual no ocurre en la EIA mediante el uso de redes complejas donde se obtiene un único valor de importancia potencial. Para superar esta limitación, la comparación presentada a continuación emplea los valores mínimos de los impactos identificados como negativos y los valores máximos de los identificados como positivos; al corresponder estos con la categoría de mayor significancia.

Adicionalmente tiene en cuenta la equivalencia realizada por los proponentes del proyecto, entre las categorías de los impactos negativos y los impactos positivos (ver tabla 15). No obstante es importante aclarar que la EIA mediante el uso de redes complejas no discrimina entre estos tipos de impactos. La tabla 14 muestra los resultados



obtenidos para la importancia total del impacto (metodología cualitativa) y la IP (EIA mediante el uso de redes complejas).

Tabla 14: **Comparación de resultados.**

Impacto	Metodología Cualitativa		Metodología de EIA mediante el uso de redes complejas				Resultado
	Imp. Total	Categoría	Grado de Entrada	Grado de Salida	IP	Categoría	
I-01	-20	Irrelevante	5	7	12	Irrelevante	Equivalente
I-02	-38	Moderado	27	17	44	Severo	Aumentó
I-03	-35	Moderado	37	13	50	Severo	Aumentó
I-04	-47	Moderado	12	19	31	Moderado	Equivalente
I-05	-29	Moderado	21	10	31	Moderado	Equivalente
I-06	-43	Moderado	28	16	44	Severo	Aumentó
I-07	-28	Moderado	35	25	60	Critico	Aumentó
I-08	-29	Moderado	6	25	31	Moderado	Equivalente
I-09	-45	Moderado	21	21	42	Severo	Aumentó
I-10	-27	Moderado	22	18	40	Severo	Aumentó
I-11	-19	Irrelevante	15	2	17	Irrelevante	Equivalente
I-12	-27	Moderado	11	4	15	Irrelevante	Se redujo
I-13	-27	Moderado	12	14	26	Moderado	Equivalente
I-14	-24	Irrelevante	17	6	23	Irrelevante	Equivalente
I-15	-23	Irrelevante	8	5	13	Irrelevante	Equivalente
I-16	-27	Moderado	18	3	21	Irrelevante	Se redujo
I-17	-36	Moderado	22	20	42	Severo	Aumentó
I-18	-24	Irrelevante	20	2	22	Irrelevante	Equivalente
I-19	-24	Irrelevante	11	9	20	Irrelevante	Equivalente
I-20	57	Muy importante	23	31	54	Muy importante	Equivalente
I-21	-27	Moderado	28	31	59	Critico	Aumentó
I-22	-21	Irrelevante	18	5	23	Irrelevante	Equivalente
I-23	48	Importante	34	17	51	Muy importante	Aumentó
I-24	-41	Moderado	28	29	57	Critico	Aumentó
I-25	-24	Irrelevante	19	22	41	Severo	Aumentó
I-26	41	Importante	24	30	54	Muy importante	Aumentó
I-27	46	Importante	28	26	54	Muy importante	Aumentó
I-28	-37	Moderado	23	25	48	Severo	Aumentó
I-29	-37	Moderado	22	13	35	Moderado	Equivalente
I-30	43	Importante	25	15	40	Muy importante	Aumentó
I-31	-39	Moderado	12	1	13	Irrelevante	Se redujo
I-32	43	Importante	25	4	29	Importante	Equivalente



Impacto	Metodología Cualitativa		Metodología de EIA mediante el uso de redes complejas				Resultado
	Imp. Total	Categoría	Grado de Entrada	Grado de Salida	IP	Categoría	
I-33	43	Importante	20	20	40	Muy importante	Aumentó
I-34	43	Importante	24	5	29	Importante	Equivalente
I-35	-30	Moderado	31	10	41	Severo	Aumentó
I-36	-43	Moderado	60	5	65	Critico	Aumentó
I-37	43	Importante	28	17	45	Muy importante	Aumentó
I-38	-52	Severo	16	7	23	Irrelevante	Se redujo

Con estos resultados es posible concluir que el 39,47% de los impactos se mantuvo en la misma categoría, mientras que el 50,0% y 10,53% fueron incluidos en una categoría de mayor y menor significancia, respectivamente (ver figura 5). Esto implica que mediante el uso de la metodología propuesta se obtienen impactos de mayor significancia, sin la necesidad de calificar atributos cualitativos. En la figura 6 puede observarse como se reduce el porcentaje de impactos irrelevantes y moderados, y aumentan los severos y críticos.

Tabla 15: **Categorías empleadas para la caracterización de los impactos.**

CARÁCTER NEGATIVO		CARÁCTER POSITIVO	
Irrelevante	<-25	Poco importante	<+25
Moderado	-25 A <-50	Importante	+25 A +50
Severo	-50 A -75	Muy importante	>+50
Critico	>-75		

Figura 5. Resultados obtenidos

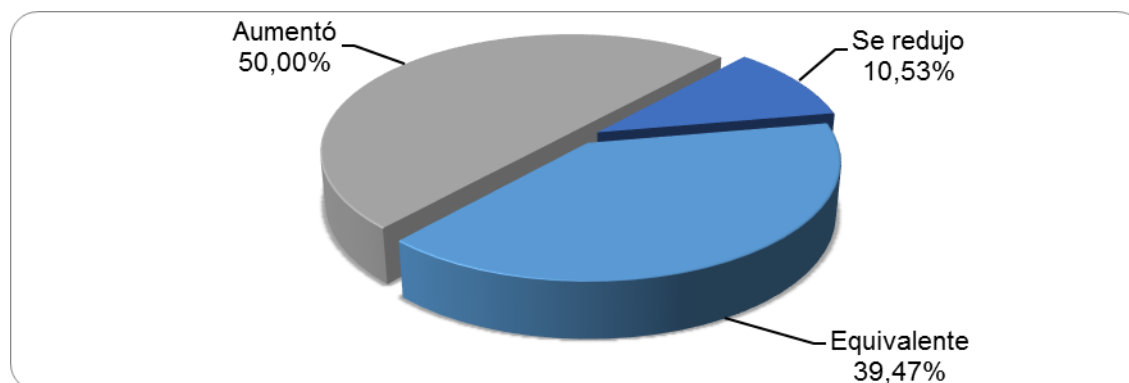
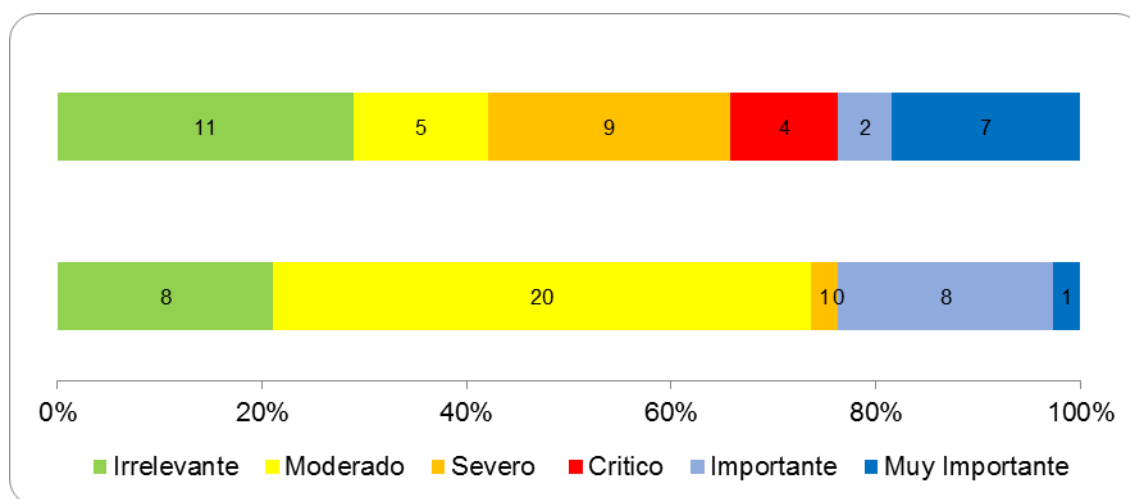




Figura 6. Diferencias entre los resultados obtenidos con la EIA mediante el uso de redes complejas y la metodología cualitativa.



Ventajas y limitaciones de la metodología de EIA mediante el uso de redes complejas

Las ventajas que ofrece la metodología son:

- No requiere la calificación de atributos para la determinación de la importancia del impacto, reduciendo la subjetividad del evaluador y la tendencia a sobre-estimar o sub-estimar la importancia, modificando las categorías de los atributos.
- No emplea un rango fijo para la definición de los impactos (crítico, severo, moderado, compatible o irrelevante), sino que proporciona un índice de importancia relativo que puede ser interpretado de acuerdo a los resultados obtenidos en cada proyecto.
- La determinación de las relaciones de causalidad es más rápida que la calificación de atributos, si se posee suficiente información del medio en el cual se desarrollará el proyecto y las actividades a realizar.
- Al basarse en la identificación de las relaciones de causalidad directa se puede discernir con facilidad si la relación existe o no.
- Facilita la identificación de los impactos significativos al reunir en una sola grafica todos los componentes (actividades y/o impactos) del proyecto.
- El análisis grafico permite comprender las relaciones de causalidad de los impactos de manera extensa (impactos secundarios, terciarios, etc.), evidenciando relaciones entre los componentes que no son fácilmente detectables mediante el uso de matrices.



6. CONCLUSIONES

La incorporación de elementos de la teoría de los sistemas complejos y particularmente, el uso de herramientas para su modelación, contribuyen a la disminución de la incertidumbre en los EsIA, al complementar la integralidad del análisis sistémico con el reconocimiento de las relaciones complejas que se dan entre los componentes de un proyecto (actividades, factores e impactos ambientales). El análisis de estas relaciones, permite superar algunos de los factores que posibilitan la incertidumbre en los resultados de los EsIA, como por ejemplo el uso de atributos y de las escalas o rangos de categorización para identificar, calificar y priorizar los impactos ambientales de un proyecto, obra o actividad.

Algunos de estos factores de incertidumbre son omitidos por la EIA mediante el uso de redes complejas al basarse en la determinación de las relaciones de causalidad, sin el uso de calificaciones de atributos, etiquetas numéricas, ni rangos estáticos para su interpretación. Lo cual supera el análisis causa-efecto de las actividades versus los componentes ambientales de la metodología de cualitativa. En vez de esto la metodología propuesta emplea una matriz de adyacencia, en la que se determine la existencia o no de una relación de causalidad entre actividades e impactos y entre impactos e impactos; y la incorporación del grado de entrada y salida para la determinación de la importancia potencial del impacto. Posibilitando la valoración de los impactos secundarios, terciarios, etc. y su identificación grafica mediante el análisis de redes.

Al definir los rangos de categorización de los impactos con base en los cuartiles de los resultados obtenidos para la IP, la EIA mediante el uso de redes complejas permite identificar los impactos relevantes de los proyectos, eliminando la posibilidad enmascarar los impactos críticos y severos, mediante la manipulación de los rangos de categorización, las etiquetas numéricas de los atributos y/o la función de importancia. Por su parte el uso del grado de entrada y salida, facilita la diferenciación de los impactos significativos, por su característica de ser causa o consecuencia, permitiendo enfatizar las medidas de manejo de los impactos hacia la eliminación de las causas (mediante acciones preventivas) o la disminución de los efectos (mediante acciones correctivas o mitigatorias) en los planes de manejo ambiental (PMA).

La aplicación de la metodología permitió reconocer las ventajas presentadas anteriormente, así también las siguientes limitaciones: el uso de software sujeto a licenciamiento (Ucinet 6.0 y Netdraw), la necesidad de capacitar a los evaluadores en el uso de estos programas, la dificultad para discriminar impactos positivos de negativos y la posibilidad de manipular los resultados mediante la omisión de relaciones de causalidad.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Benson, J. F. (2003). What is the alternative? Impact assessment tools and sustainable planning. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 21(4), 261-280. JOUR.
- Bisset, R., & Tomlinson, P. (1988). Monitoring and auditing of impacts. En P. Wathern



- (Ed.), *Environmental Impact Assessment Theory and Practice* (pp. 117-128). London.
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D.-U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5), 175-308. JOUR. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>
- Buckley, R. (1992). How accurate are environmental impact predictions. *Ambio*, 20(3-4), 161-162.
- Byron, H. J., Treweek, J. R., Sheate, W. R., & Thompson, S. (2000). Road developments in the UK: An analysis of ecological assessment in environmental impact statements produced between 1993 and 1997. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43(1), 71-97. JOUR.
- Chivat, I. (2016). Coping with uncertainty in environmental impact assessments . Open criteria and techniques. *Environmental Impact Assessment Review*, 60(February), 24-39. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.02.006>
- Conesa, V. (1996). *Guía metodológica para la evaluación del Impacto Ambiental*. (3ª edición). Madrid: Mundi-Prensa Libros.
- De Jongh, P. (1988). Uncertainty in EIA. En P. Wathern (Ed.), *Environmental Impact Assessment, Theory and Practice*. London: Routledge.
- Dipper, B., Jones, C., & Wood, C. (1998). Monitoring and post-auditing in environmental impact assessment: a review. *Journal of Environmental Planning and Management*, 41(6), 731-747. JOUR.
- Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., & Rothengatter, W. (2003). *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*. BOOK, Cambridge University Press.
- Flyvbjerg, B., Holm, M. S., & Buhl, S. (2002). Underestimating costs in Public Works Projects: Error or Lie? *Journal of the American Planning Association*, 68(3), 279-296. JOUR.
- Funtowicz, S. O., & De Marchi, B. (2000). Ciencia posnormal, complejidad reflexiva y sustentabilidad. En E. Leff & S. Funtowicz (Eds.), *La Complejidad Ambiental* (1.ª ed., pp. 54-85). BOOK, Buenos Aires: Siglo XXI.
- Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (2003). Post-Normal Science. *International society for ecological economics*.
- Garmendia, A., Salvador, A., Crespo, C., & Garmendia, L. (2005). *Evaluación de impacto ambiental*. Madrid: Pearson education.
- Geneletti, D., Beinat, E., Chung, C.-J. F., Fabbri, A. G., & Scholten, H. J. (2003). Accounting for uncertainty factors in biodiversity impact assessment: Lessons from a case study. *Environmental Impact Assessment Review*, 23(4), 471-487. JOUR.
- Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2005a). *Introduction to Environmental Impact Assessment*. Taylor & Francis. <http://doi.org/10.4324/9780203023068>
- Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2005b). *Introduction to environmental impact assessment*. (J. Glasson, R. Therivel, & A. Chadwick, Eds.) (3.ª ed.). BOOK, Taylor & Francis.
- Jay, S., Jones, C., Slinn, P., & Wood, C. (2007). Environmental impact assessment: Retrospect and prospect. *Environmental Impact Assessment Review*, 27(4), 287-



300. JOUR.

- Leung, W., Noble, B. F., Jaeger, J. A. G., & Gunn, J. A. E. (2016). Disparate perceptions about uncertainty consideration and disclosure practices in environmental assessment and opportunities for improvement. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 89-100. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.001>
- Mac Mahon, B., Pugh, T., & Temoche, A. (1965). Conceptos de causa. En *Principios y métodos de la epidemiología*. México: La Prensa Médica Mexicana.
- Morgan, R. K. (1998). *Environmental Impact Assessment: A Methodological Perspective*. London: Kluwer.
- Ortolano, L., Jenkins, B., & Abracosa, R. P. (1987). Speculations on when and why EIA is effective. *Environmental Impact Assessment Review*, 7(4), 285-292. [http://doi.org/10.1016/0195-9255\(87\)90002-3](http://doi.org/10.1016/0195-9255(87)90002-3)
- Phillips, J. (2011). The conceptual development of a geocybernetic relationship between sustainable development and Environmental Impact Assessment. *Applied Geography*, 31(3), 969-979. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.01.015>
- Ravetz, J. R. (1999). What is post-normal science. *Futures*, 31(7), 647-653. JOUR.
- Restrepo, A., & Cuadros, A. (2013). Expost evaluation of projects' socio -environmental impact. *Evaluación del impacto socioambiental de proyectos*, 38(5), 339-346. JOUR.
- Teigland, J. (2000). *Impact assessments as policy and learning instrument. Why effect predictions fail, and how relevance and reliability can be improved*. Roskilde University.
- Tennøy, A., Kværner, J., & Gjerstad, K. I. (2006a). Uncertainty in environmental impact assessment predictions: The need for better communication and more transparency. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 24(1), 45-56. JOUR.
- Tennøy, A., Kværner, J., & Gjerstad, K. I. (2006b). Uncertainty in environmental impact assessment predictions: The need for better communication and more transparency. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 24(1), 45-56.
- Tobasura, I., & Sepulveda, L. H. (1997). *Proyectos ambientales escolares: estrategia para la formación ambiental*. (Cooperativa Editorial Magisterio, Ed.). Santa Fe de Bogotá.
- Toro, J. (2009). *Tesis Dr isbn*. Granada University.
- Toro, J., Requena, I., Duarte, O., & Zamorano, M. (2013). A qualitative method proposal to improve environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 43, 9-20.
- Toro, J., Requena, I., & Zamorano, M. (2010). Environmental impact assessment in Colombia: Critical analysis and proposals for improvement. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(4), 247-261. JOUR. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.09.001>
- Wachs, M. (1990). Ethics and advocacy in forecasting for public policy. *Business and Professional Ethics Journal*, 9(1-2), 141-157.
- Wang, Y., Yang, J., & Xu, D. (2006). Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach. *European Journal Of Operational Research*, 174(3), 1885-1913. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.059>
- Wilkins, H. (2003). The need for subjectivity in EIA: Discourse as a tool for sustainable development. *Environmental Impact Assessment Review*, 23(4), 401-414. JOUR.



Wood, C., Dipper, B., & Jones, C. (2000). Auditing the assessment of the environmental impacts of planning projects. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43(1), 23-47. JOUR.