

## **Propuesta metodológica para el análisis de vulnerabilidad ambiental ante un posible derrame de poliductos y oleoductos**

Oscar Mauricio Blanco Castañeda<sup>1</sup>  
Gloria Lucia Camargo Millán<sup>2§</sup>

<sup>1</sup>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Avenida Central del Norte 39-115, 150003 Tunja, Tunja, Boyacá, Colombia. (oscar5267@hotmail.com). <sup>2</sup>Universidad de Manizales. Cra. 9a ### 19-03, Manizales, Caldas, Colombia.

§Autor para correspondencia: gloria.camargo@uptc.edu.co.

### **Resumen**

La industria de hidrocarburos en Colombia es una de las más dinámicas, en comparación a otros frentes de producción minera. Los hidrocarburos se han convertido en elementos fundamentales para el desarrollo de la sociedad, en el ámbito económico, político, ambiental y social. Sin embargo, su explotación, junto con las características topográficas y climatológicas de Colombia, se han convertido en una amenaza para el medio ambiente, ya que son elevadas las probabilidades de un derrame, que de forma directa o indirecta tiene efectos tóxicos sobre la fauna, flora, cuerpos de agua y la población en general. Estas alteraciones provocan interferencia en la reproducción, crecimiento y comportamiento de los animales. Afectan los sistemas radiculares provocando la caída de hojas y muerte de árboles. Adicionalmente, provoca pérdidas económicas y migración de la población afectada, debido a la dificultad para eliminar de forma rápida el contaminante, el cual provoca impactos de corto, mediano y largo plazo.

**Palabras clave:** contaminante, hidrocarburos, minería.

Recibido: agosto de 2020

Aceptado: septiembre de 2020

La falta de estudios que integrarán las variables del medio ambiente, no permitía analizar la vulnerabilidad considerando la complejidad del espacio geográfico, para lo cual se requería el establecimiento de una metodología con base en el uso de sistemas de información geográfica, que determinara el grado de vulnerabilidad de los hábitats con influencia directa o indirecta con poliductos y oleoductos, mediante la valoración de los impactos generados en las poblaciones y en los ecosistemas naturales, por la extracción y un posible derrame de hidrocarburos.

Como medida para realizar un posible análisis predictivo de los impactos generados por este fenómeno, el análisis espacial con sistemas de información geográfica ha sido una de las herramientas más utilizadas para determinar los tramos que podrían causar mayor afectación al medio ambiente, mediante la simulación de posibles derrames superficiales, por lo tanto esta metodología permitió analizar los elementos del medio que se encontraban a lo largo de un ducto, teniendo en cuenta la interacción entre cada uno de ellos.

Para realizar un análisis integrado de los factores ambientales y su relación con el medio, se priorizaron los elementos del ecosistemas y las posibles causas mediante el uso de la metodología de proceso de análisis jerárquico propuesto por Saaty (2018), para determinar cuál es la interacción de cada uno de los elementos con la tubería, por lo tanto, con esta propuesta se desarrolló una metodología para el análisis de vulnerabilidad ambiental ante un posible derrame proveniente de los poliductos y oleoductos, contemplando los factores biótico, abiótico y socioeconómico.

### **Definición del problema**

La industria de hidrocarburos en Colombia hoy en día es una de las más dinámicas, en comparación a otros frentes de producción minera. Los hidrocarburos se han convertido en elementos fundamentales para el desarrollo de la sociedad, ya que no se limita al ámbito económico, sino que también aborda la política, el ambiente y el factor social de una sociedad (Martínez, 2012).

La producción de hidrocarburos en cuanto a cobertura geográfica se encuentra en cuencas sedimentarias y abarca aproximadamente 646 000 km<sup>2</sup> lo que equivale a 40% del territorio nacional. Esta se encuentra distribuida a lo largo de todas las regiones naturales del país, incluida la plataforma continental de los océanos atlántico y pacífico (ANH, 2011).

La localización geográfica y las características climatológicas de Colombia, lo convierten en una nación con una gran biodiversidad (Andrade, 2011a); por lo tanto, es un país potencialmente vulnerable a eventos de origen antropogénico y natural, que aumentan la probabilidad de impacto debido a un eventual derrame de hidrocarburos, ya que la infraestructura de la actividad minera, coincide con las áreas limítrofes de los parques nacionales naturales (PNN).

Los impactos generados por el derrame de hidrocarburos ocasionan efectos tóxicos sobre la fauna y la flora debido a la composición fisicoquímica, provocando la variabilidad de los sistemas biológicos. Estas alteraciones provocan interferencia en la reproducción, crecimiento y comportamiento de los animales. Afectan los sistemas radicales provocando la caída de hojas y muerte de árboles. Adicionalmente, provoca pérdidas económicas y migración de la población afectada. La magnitud del daño ocasionado se refleja por la cantidad de hidrocarburo derramado, ya que una pequeña cantidad de hidrocarburo en un área vulnerable puede ocasionar un daño mucho mayor que una gran cantidad de derrame en un área poco vulnerable (Etter *et al.*, 2008).

Algunos estudios realizados por la defensoría del pueblo han determinado que en Colombia el derrame de hidrocarburos es once veces más que el derrame que se produjo en 1989 por parte del buque petrolero Exxon Valdez, en Alaska, catalogado como el incidente con mayor contaminación e impacto ambiental en el mundo, cuyos efectos no han sido remediados en su totalidad (Ruiz, 2004).

Los derrames de hidrocarburos en el país se producen de forma accidental producto de la falla y el deterioro de la infraestructura utilizada, pero la mayoría se le atribuye a la voladura de oleoductos por parte de los grupos armados presentes en Colombia según la defensoría del pueblo (Andrade *et al.*, 2012; Franco *et al.*, 2013).

El análisis espacial con sistemas de información geográfica ha sido una de las herramientas más utilizadas para determinar los tramos que podrían causar mayor afectación al medio ambiente, mediante la simulación de posibles derrames superficiales. Esta metodología permite analizar los elementos del medio que se encuentran a lo largo del ducto, sin tener en cuenta la interacción que hay entre ellos. Para realizar un análisis integrado de los factores ambientales y su relación con el medio, se deben complementar las metodologías con métodos ya existentes para poder determinar cuál es la interacción de cada uno de los elementos con la tubería.

La falta de estudios que integren las variables del medio ambiente y permitan analizar la vulnerabilidad considerando la complejidad del espacio geográfico, requiere el establecimiento de una metodología que en base al uso de sistemas de información geográfica, determine el grado de vulnerabilidad de los hábitats que tengan influencia directa o indirecta con poliductos y oleoductos, mediante la valoración de los impactos generados en las poblaciones y en los ecosistemas naturales, por la extracción y un posible derrame de hidrocarburos, por lo cual esta investigación pretende responder la siguiente pregunta: ¿de qué manera se pueden integrar la modelación de derrames de hidrocarburos, y la evaluación de la vulnerabilidad en una metodología para clasificar poliductos y oleoductos en función del impacto sobre el medio ambiente?

## **Justificación**

La extracción de hidrocarburos en Colombia ha generado en sus diferentes etapas impactos ambientales, contaminación y cambios en los factores biótico, abiótico y socioeconómico. Los efectos del hidrocarburo sobre cada uno de los factores pueden ser causados, bien sea por sus propiedades físicas o por sus componentes químicos, generando gran preocupación, ya que a menudo los derrames accidentales causan contaminación de los hábitats y los cuerpos de agua. Por lo tanto, se requiere la formulación de nuevas metodologías, para el análisis de los efectos que de forma directa o indirecta pueda afectar los ecosistemas y la población en general.

Adicionalmente en el país no se han desarrollado herramientas que aporten información para evaluar la vulnerabilidad de todos los factores frente a los impactos ambientales, producto de los derrames de hidrocarburos. Por lo tanto, se hace necesario el desarrollo de una metodología que mejore el estudio frente a esta problemática y aporte al desarrollo de nuevo conocimiento en el país.

## **Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad es descrita como el grado de sensibilidad física, biótica y socioeconómica y cultural frente a una actividad antrópica o un evento natural. Es usada como una herramienta que reduce la incertidumbre de los datos que se analizan frente al daño o exposición de un aspecto ambiental, los cuales se basan en indicadores ambientales y no dependen exclusivamente de la ponderación elaborada por el evaluador, sino que también se determina por el estado de los indicadores del sitio, donde se realizan las actividades y proyectos involucrados. El concepto de vulnerabilidad reduce la subjetividad en los resultados obtenidos, ya que la interpretación está influenciada por la presión de los proyectos sobre cada uno de los componentes del medio ambiente, por lo que resulta importante para la comprensión de alteraciones que se generan en el ambiente.

La vulnerabilidad en términos más generales se define como la susceptibilidad a daños, debido a la sensibilidad o a la exposición de un sistema, personas y lugares a los impactos o perturbaciones y la capacidad del sistema para adaptarse a condiciones cambiantes (Kelly y Adger, 2000; Smith y Pilifosova, 2002; Luers *et al.*, 2003; Turner *et al.*, 2003).

## **Análisis multicriterio**

El análisis multicriterio es un conjunto de técnicas, modelos, métodos y herramientas que tiene como objetivo mejorar la calidad integral de los procesos de decisión en cuanto a la efectividad, eficacia y eficiencia y así incrementar el conocimiento de estos. El uso de estas técnicas permite la realización de una resolución más realista y a la vez mas practica sin tener en cuenta otros factores que arrojan resultados herrados 1. Este análisis compara las alternativas que pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas, por medio de puntuaciones que se obtienen de diferentes criterios (Belacel, 2000; Smith *et al.*, 2000).

## **Proceso de análisis jerárquico (PAJ)**

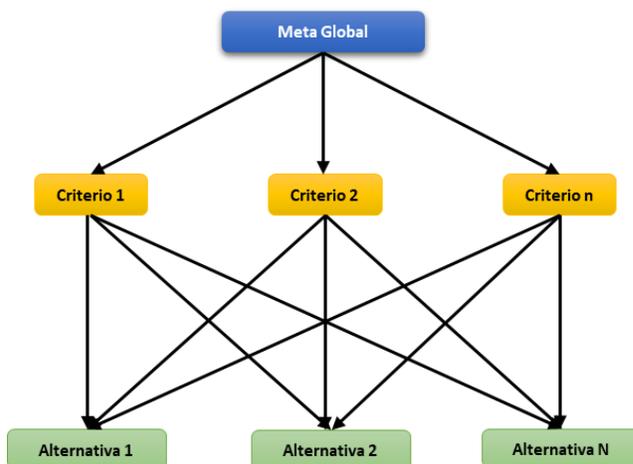
El proceso de análisis jerárquico, fue desarrollado por Thomas Saaty a finales de los años 60 quien, a partir de su experiencia docente e investigaciones de tipo militar, diseño una herramienta que facilitaría la toma de decisiones frente a un tema en particular, la cual ha sido aplicada la base de muchos paquetes de software para los procesos de tomas de decisiones complejas.

El PAJ es una metodología para estructurar, medir y sintetizar datos, donde se evalúan alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios, y está basado en el principio de la experiencia y el conocimiento de los actores involucrados y los datos utilizados en el proceso los datos utilizados en el proceso (Frei, 1998; Fulcrum, 2000; Moreno, 2018; Bahurmoz-Asma, 2003; Bascetin, 2004; Subramaniam, 2009).

El proceso de análisis jerárquico utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior.

Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión (Figura 1).

El procedimiento para usar el PAJ puede ser resumido en las siguientes premisas: El primer paso del PAJ consiste en modelar el problema de decisión que se pretende resolver como una jerarquía, la toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos (Figura 1).



**Figura 1. Esquema proceso de análisis jerárquico (Saaty, 2008).**

### Zonificación ambiental

La zonificación ambiental es una herramienta valiosa para la planificación y el uso de los recursos naturales, en ella se identifican unidades de manejo ambiental acorde a la tasa de extracción, capacidad de uso, acervo cultural de las comunidades y capacidad de auto recuperación de los ecosistemas (Cardozo y Quintero, 2000).

El análisis integral de los criterios permite la definición de áreas de manejo de ecosistemas estratégicos, recuperación, aprovechamiento sostenible, producción sostenible y zonas urbanas y suburbanas, las cuales dan las pautas para la definición de las orientaciones de manejo integrado del área, por lo que la zonificación ambiental se constituye como una herramienta para el ordenamiento y manejo del territorio, la cual se basa en la definición e integración de criterios que consideran aspectos biofísicos, socioeconómicos y de gobernabilidad (Rodríguez *et al.*, 2012).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de componentes específicos que permiten a los usuarios finales crear consultas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio. La información geográfica va a ser aquella información que tiene algún componente espacial; es decir, una ubicación y además, una información atributiva que nos detalle más sobre ese elemento en cuestión. Esa ubicación se podrá definir con un nombre de una calle, por ejemplo, o con coordenadas espaciales (Martínez y Coll, 2005).

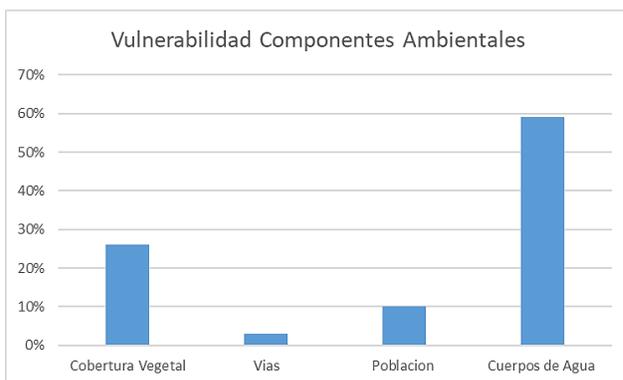
Un Sistema de Información Geográfico (SIG) permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica. Esto quiere decir que en un solo mapa el sistema muestra la distribución de recursos, edificios, poblaciones, entre otros datos de los municipios, departamentos, regiones o todo un país. Este es un conjunto que mezcla hardware, software y datos geográficos y los muestra en una representación gráfica. Los SIG están diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada. En general, los SIG son empleados para el almacenamiento, análisis e integración de datos de campo, información proveniente de sensores remotos (imágenes o fotografías aéreas), cartografía, estadísticas y percepción de las comunidades.

**Desarrollo del proyecto**

Para realizar la evaluación multicriterio mediante el método del proceso de análisis jerárquico (PAJ) propuesto por Saaty (2008), se definieron las unidades de decisión, estableciendo como criterios los componentes ambientales y alternativas las consecuencias que se generan ante un posible derrame de hidrocarburos, donde se establece la estructura jerárquica y se realiza la ponderación para determinar cuáles pueden ser los criterios más afectados frente a las alternativas evaluadas, para identificar los componentes más vulnerables del medio ambiente; por lo tanto después de realizar el juicio de expertos (Cuadro 1), se establece que los cuerpos de agua (59%) y las coberturas vegetales (26%) presentan los valores más altos de vulnerabilidad frente a un derrame (Figura 1), ya que la afectación en estos compontes ambientales puede generar impactos sumamente negativos.

**Cuadro 1. Matriz comparación de pares-componentes ambientales.**

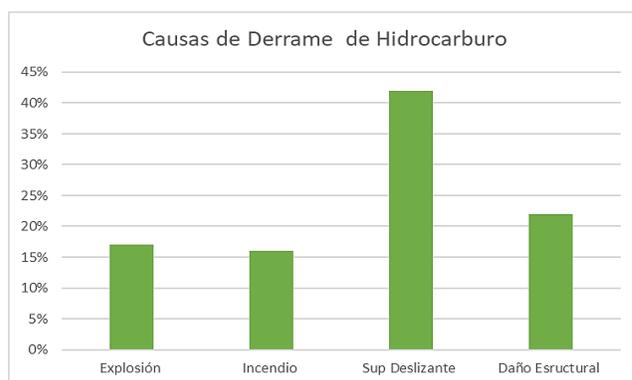
	Cobertura vegetal	Vías	Población	Cuerpos de agua	Matriz normalizada				Vector promedio
Cobertura vegetal	1	9	5	1/5	0.158451	0.375	0.378788	0.137555	0.262448
Vías	1/9	1	1/5	1/9	0.017606	0.0416667	0.015152	0.076419	0.037711
Población	1/5	5	1	1/7	0.03169	0.208333	0.0757576	0.098253	0.103509
Cuerpos de agua	5	9	7	1	0.792254	0.375	0.530303	0.687772	0.596332
Suma	6.311111	24	13.2	1.453968					



**Figura 1. Vulnerabilidad componentes ambientales.**

Según Almeida (2006) las actividades de explotación petrolera generan destrucción de la biodiversidad y del ambiente en general, donde las afectaciones de esta actividad generan daño principalmente de las coberturas vegetales y los cuerpos de agua.

Asimismo, como lo menciona Di Toro *et al.* (2007), estudios desarrollados sobre el destino ambiental del petróleo demuestran que aunque la toxicidad del crudo disminuya con la degradación biológica o física, este sigue siendo una fuente de contaminación y de toxicidad para los organismos presentes en un ecosistema por largo tiempo, por lo que la población, los cuerpos de agua y las coberturas vegetales son propicias a afectaciones cuando se presenten derrames de crudo ya sea por daños estructurales, incendios, explosiones o la presencia de superficies deslizantes (Figura 2).



**Figura 2. Vulnerabilidad componentes ambientales.**

Según la priorización de las consecuencias de los derrames de hidrocarburos con respecto a los criterios ambientales, emitidos por el juicio de expertos se determina que la superficie deslizante es el evento que causa mayor vulnerabilidad en el ambiente con una ponderación de 42% (Cuadro 2), donde Atlas y Bartha (2002), respaldan esta jerarquía, ya que para estos investigadores los accidentes de petróleo pueden ser más fácilmente contenidos en el medio ambiente, debido que los hidrocarburos son fluidos de baja viscosidad y pueden penetrar en el subsuelo y persistir, debido a las condiciones anóxicas predominantes, así como la contaminación debido a la persistencia del derrame en los acuíferos.

**Cuadro 2. Priorización consecuencias derrames de hidrocarburo vs componentes ambientales.**

	Cobertura vegetal	Vías	Población	Cuerpos de agua	Total
Explosión	0.3341949	0.2203727	0.5885918	0.03808484	0.1796548
Incendio	0.2795446	0.041749	0.2423832	0.11101958	0.1662337
Sup. deslizante	0.2316776	0.6362144	0.0449806	0.56847203	0.4284497
Daño estructural	0.1545828	0.1016645	0.1240443	0.02824235	0.2256618
Ponderación	0.2624483	0.0377108	0.1035086	0.59633237	

## Conclusiones

Tanto Laurance (1989); Reyes y Ajamil (2005), consideran que las pérdidas de hábitat como consecuencia de las actividades propias para la explotación de hidrocarburos son uno de los ítem por los cuales se ha perdido notoriamente la biodiversidad y esto es muy evidente en la actualidad ya que en las zonas propias de este tipo de actividades es común ver zonas de erosión por la devastación producida por la tala de árboles, así como los impactos a las coberturas vegetales, cuerpos de agua, población e incluso vías cuando se presentan derrames de este producto.

## Literatura citada

- Almeida, A. 2006. Fases e impactos de la actividad petrolera. *In*: manuales de monitoreo ambiental comunitario. Acción Ecológica. Quito. 167-169 pp.
- Andrade, G. I.; Franco, L. and Delgado, J. 2012. Socio-ecological barriers to adaptive management of Lake Fúquene, Colombia. *Inter. J. Design Nature Ecodynamics*. 7(3):251-260.
- Andrade, C. M. G. 2011a. Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ambiente-política. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 35(137):491-507.
- ANH. 2011. Indicadores de gestión y estadísticas de la industria.
- Atlas, R. M. y Bartha, R. 2002. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Pearson Educación, SA. Madrid, España. 696 p.
- Bahurmoz-Asma, M. A. 2003. The analytic hierarchy process at Dar Al-Hekma, Saudi Arabia. *Interfaces*. 33(4):70-78.
- Bascetin, A. 2004. An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine. Technical note. *Mining technology: transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 113(3):192-199.
- Belacel, N. 2000. Multicriteria assignment method PROAFTN: methodology and medical application. *Eur. J. Operational Res.* 125(1):175-183.
- Cardozo, R. y Quintero, Q. 2000. Zonificación agrícola como herramienta básica para el ordenamiento ambiental de un territorio (caso: Toluviejo-Sucre). *Universidad Nacional de Colombia. Tomado de Clepsidra número 2*. 99-108 pp.
- Di Toro, D. M.; McGrath, J. A. and Stubblefield, W. A. 2007. Predicting the toxicity of neat and weathered crude oil: toxic potencial and the toxicity of saturated mixtures. *Environ. Toxicol. Chem.* 26(1):24-36.
- Etter, A.; McAlpine, C. and Possingham, H. 2008. Historical patterns and drivers of landscape change in colombia since 1500: a regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers*. 98(1):2-23.
- Franco, L.; Useche, D. C. y Hernández, S. 2013. Biodiversidad y el cambio antrópico del clima: ejes temáticos que orientan la generación de conocimiento para la gestión frente al fenómeno. *Ambiente y Desarrollo*. 17(32):79-96.
- Frei, F. and Harker, P. 1998. Measuring aggregate process performance using AHP. Working Paper. The Wharton School. University of Pennsylvania. 432-436 pp.
- Fulcrum Ingeniería Ltda. 2000. *Proyectos y asesorías con el analitiy hierarchy process (AHP)*. Chile.
- Kelly, P. and Adger, W. N. 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Clim. Chang.* 47:325-352.

- Laurance, W. F. 1989. Ecological impacts of tropical forest fragmentation on nonflying mammals and their habitats. PhD. Dissertation, University of California, Berkeley Biological Conservation. 69(1):23-32.
- Luers, A.; Lobella, D.; Sklard, L.; Addamsa, L. and Matsona, P. 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Glob. Environ. Chang.* 13:255-267.
- Martínez-Llario, J. C. and Coll-Aliaga, E. 2005, “Análisis vectorial en PostGIS y Oracle Spatial: estado actual y evolución de la especificación Simple Features for SQL”, In *Jornadas Técnicas para la Infraestructura de Datos Espaciales de España*. 7 p.
- Martínez, A. 2012. Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Fedesarrollo.
- Moreno, S. E. 2018. El nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México en el ex lago de Texcoco, Estado de México, problemática socioterritorial y ambiental. *Revista CS.* 26:203-235.
- Reyes, F. y Ajamil, C. 2005a. Descripción de los impactos de la actividad petrolera. *In: petróleo, amazonía y capital natural*. Fondo Editorial, CCE. Quito. 7 p.
- Rodríguez, A.; Lozano, P. y Sierra, P. 2012. Criterios de zonificación ambiental usando técnicas participativas y de información: estudio de caso zona costera del departamento del atlántico. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*. Santa Marta, Colombia. 41(1):61-83.
- Ruiz-Correa, J. 2004. Crímenes ecológicos de EXXON siguen impunes por retardo del sistema judicial de EE. UU. que pretende quebrar a PDVSA. *Revista del Sur*. 149-150 pp.
- Saaty, T. L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International J. Services Sci.* University of Pittsburgh, USA. 1(1):83-98.
- Smith, B. and Pilifosova, O. 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Clim Chang.* 45(1):223-251.
- Smith, Q. R.; Mesa, S. O.; Dyer, R. I.; Jaramillo, A. P.; Poveda, J. G. y Valencia, R. D. 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2<sup>da</sup>. Edición. 197-211.
- Subramaniam, V. and Lee, K. 2000. Dynamic selection of dispatching rules for job shop scheduling. *Production Planning and Control*. 11(1):73-81.
- Turner, II. B.; Matson, P.; McCarthy, J.; Corell, R.; Christensen, L.; Eckley, N. and Hovelsrud-Broda, G. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 100(14):8074-8079.