

# ÍNDICE DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL ANTE DERRAME PETROLERO APLICANDO EVALUACIÓN MULTICRITERIO, NÚMEROS DIFUSOS Y SIG, LAGO DE MARACAIBO, VENEZUELA

ENVIRONMENTAL SUSCEPTIBILITY INDEX IN VIEW OF THE OIL SPILL IN LAKE MARACAIBO, VENEZUELA, USING MULTICRITERIAL EVALUATION, FUZZY NUMBERS AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM

JULIAN A. GUTIÉRREZ<sup>1</sup> y  
HERVÉ JEGAT<sup>2</sup>

RECIBIDO: 17-03-11  
ACEPTADO 25-08-11

<sup>1</sup> Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela. E-mail: jgutie@ula.ve

<sup>2</sup> Universidad de Los Andes. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT-ULA). Mérida, Venezuela. E-mail: hjegat@ula.ve

## RESUMEN

Se propone un procedimiento metodológico para el diseño de un modelo de Índice de Sensibilidad Ambiental (ISA) bajo Sistemas de Información Geográfica (SIG), y se ejemplifica mediante la determinación de niveles de sensibilidad ambiental ante un derrame petrolero, a lo largo de la línea de costa del Lago de Maracaibo, Venezuela. El método propuesto, denominado *Método de Ponderación Aditiva Difusa* (MPAD), utilizando Evaluación Multicriterio (EMC), números difusos y variables lingüísticas en la estructuración de las reglas de decisión del modelo. Para la selección de las bandas satelitales a utilizar se aplicó la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP). Se empleó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN) para discriminar sectores con vegetación densa e inundable. Los resultados obtenidos están dados por las diferentes sensibilidades de los tipos de costa. Con el MPAD se generan cuatro coberturas o mapas finales de sensibilidades (a, b, c, y d), o escenarios. Se escoge la cobertura con los valores más altos (d), cuyas sensibilidades y sus pesos se organizan en el siguiente orden: el tipo de costa más sensible es el manglar, en sus primeros 40 m a partir de la línea de costa (con un valor de 1,80), continuando el ecosistema estuarino cerca de la orilla (1,50), el manglar entre 40 y 100 m costa adentro (1,32), la costa urbana cerca de la orilla (1,20), el estuario costa adentro (1,02), la playa arenosa cerca de la orilla (1,00), la costa urbana lejos de la orilla (0,72), y por último la playa arenosa lejos de la orilla (0,52). El MPAD, complementado con técnicas EMC, demostró ser robusto, por sus fundamentos teóricos y facilidad de uso, su aplicabilidad bajo SIG, y su flexibilidad de aplicación bajo el enfoque de los números difusos, aplicados a las reglas de decisión, lo que permite la creación de escenarios, y de ésta forma mejorar el proceso de toma de decisiones y el diseño de medidas mitigantes y protectoras ante un derrame petrolero.

**Palabras clave:** índice de sensibilidad ambiental, derrames petroleros, sistemas de información geográfica, técnicas de evaluación multicriterio, Lago de Maracaibo, Venezuela.

## SUMMARY

We here propose a methodological procedure for designing Environmental Susceptibility Index (ISA) using Geographical Information System (SIG). We illustrate its application in an oil spill case along the shorelines of Lake Maracaibo, Venezuela. The proposed method, called Fuzzy Additive Weighing Method (MPAD), uses Multicriterial Evaluation, Fuzzy Numbers and rules of linguistic variables in structural decision making of the model. For satellite band selection in the analysis, we used Principal Component Analysis (ACP). We also employed Index of Normalized Vegetation Difference (IVDN) for discriminating sectors with dense vegetation and flood-prone area. The results obtained are given according to sensibility differences in costal types. With MPAD we could generate 4 coverage sceneries or final maps of sensibilites (a, b, c, d). We then chose a coverage with the highest values (d) in which sensibilites and their weight are organized in the following order. The most sensible coastal type was the mangrove in its first 40 meters from the coastal line (its value being 1.80), followed by the estuary ecosystem near the shore (1.50), the mangrove between 40 and 100 meters from the shore (1.32), the coast with human habitation near the shore (1.20), the interior estuary (1.02), the sandy beach near the shore (1.00), urbanized coast away from the shore (0.72) and the sandy beach away from the shore (0.52). MPAD method demonstrated itself to be robust for its theoretical foundations, ease of use, its applicability under SIG, its application flexibility under fuzzy numbers approach and its decision making rules. It allowed creation of sceneries in improving the decision making and in designing relief and protective measures in the wake of petroleum spillages.

**Key words:** Index of Environmental Sensibility, oil spill, Geographical Information System, Multicriterial Evaluation technique, Fuzzy Numbers, satellite images, Lake Maracaibo, Venezuela.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente ha tomado auge la discusión sobre los aspectos ambientales, la contaminación y sus efectos han ganado un papel protagonista en los foros mundiales, en parte ha sido una consecuencia positiva de la problemática. Cuando se revisa a profundidad el tema, se constata que gran parte de las soluciones está en mejorar la gestión que hacemos del ambiente, si se quiere, hace falta más gestión preventiva. La *sensibilidad ambiental* se entiende como el potencial de afectación (transformación o cambio) que pueden sufrir los componentes ambientales como resultado de la alteración de los procesos físicos, bióticos y socioeconómicos debidos a las actividades de intervención antrópica sobre el medio o debido a los procesos de desestabilización natural que experimenta el ambiente (Sandia y Roa, 1990). Debido a su carácter geográfico, es decir, maneja variables ambientales con ubicación geográfica propia o coordenadas geográficas, el *Análisis de Sensibilidad Ambiental* (ASA) puede ser desarrollado mediante *modelos de análisis espacial*, fundamentales en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En relación al Análisis Espacial, Goodchild (1987), en Barredo (1996), lo define como un conjunto de técnicas cuyos resultados son dependientes de la localización de los objetos o eventos analizados, requiriendo el acceso a la *localización* y los *atributos* de los mismos, esto es, a ambos componentes del dato espacial; dichas técnicas se refieren desde simples medidas descriptivas de patrones de elementos hasta complejos tests estadísticos sobre conjuntos de procedimientos generados por procesos específicos.

Barredo (1996), afirma que los modelos espaciales pueden ser utilizados principalmente para tres propósitos: *predicción y generación de escenarios; generación y/o diseño de políticas; y*

*análisis del impacto* de las mismas. Igualmente, afirma que el modelado espacial debe entenderse en el entorno de los SIG como un aspecto paralelo en su desarrollo al análisis espacial, ya que el modelado utiliza en buena medida una serie de operaciones de análisis espacial para lograr sus fines. Se propone, en éste trabajo, un procedimiento metodológico que incluye la aplicación de las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y la Teoría de la Lógica Difusa, a través de los *Números Difusos*, con este fin. Con respecto al uso de EMC en la toma de decisiones sobre aspectos ambientales se pueden revisar las siguientes referencias: Carver (1991), Pereira y Duckstain (1993), Jankowski (1995), Eastman *et al.* (1995), Martínez *et al.* (2000) y Gutiérrez (2001).

La Cuenca del Lago de Maracaibo ha sido, tradicionalmente, asociada a la producción petrolera en Venezuela, en ella se encuentran gran cantidad de pozos en producción; además, el cuerpo del Lago es atravesado por una importante red de tuberías que transportan el hidrocarburo. Este cuerpo de agua es asiento de numerosas actividades económicas y recreativas, lo que la hace vulnerable en caso de un *derrame de hidrocarburo*, sea de gasolina o petróleo. Si sumamos a lo anterior el hecho de que la cuenca es asiento de ecosistemas lacustres, estuarinos, ribereños y terrestres, base de sustento de especies de importancia natural y económica, y reservorio de gran cantidad de especies marinas aprovechables, de allí que existe una gran cantidad de personas dedicadas a la pesca artesanal. Por lo tanto, la afectación del cuerpo de agua a través de un derrame, sería catastrófico para ellos, podemos afirmar entonces que es importante el desarrollo de técnicas y métodos que ayuden a la toma de decisiones al momento de suceder una contingencia de este tipo, un derrame petrolero, lo que redundaría en el mejoramiento de la gestión ambiental del recurso.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los objetivos del Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA), son: 1. Jerarquizar sectores espaciales susceptibles a ser afectados, para definir prioridades de protección; 2. Suministrar información síntesis necesaria para la Toma de Decisiones; 3. Servir de instrumento básico para la Mitigación y Control del impacto ambiental (Sandia y Roa, 1990). Según los anteriores autores, el ASA está asociado a la realización de informes técnicos, la elaboración de Estudios de Caracterización Ambiental y la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental.

En términos de una evaluación ambiental, los *índices ambientales* se usan para: Resumir los datos ambientales existentes; Comunicar esta información sobre la calidad del medio ambiente afectado; *Evaluar la vulnerabilidad o susceptibilidad de una categoría o elemento ambiental*; Servir de base para expresar los impactos de las diferencias del índice evaluado, entre el valor del índice con el proyecto y el valor del índice sin proyecto; Auditar los impactos de proyectos; Evaluar los impactos integrados, expresados como cambios de *Índices de Calidad Ambiental* (ICA); y Seleccionar alternativas de uso.

En relación a los *Índices de Sensibilidad Ambiental* (ISA) respecto a derrames petroleros, se encuentran las siguientes referencias. Michel *et al.* (1978) aplican un *Índice de Vulnerabilidad* ante derrames petroleros en la línea de costa de la Ensenada Lower Cook, Alaska de los Estados Unidos. Los autores Jensen *et al.* (1990; 1993; 1998) desarrollaron tres aplicaciones de ISA, aunque exponen, los primeros, la información necesaria para construir los mapas ISA, y el proceso de creación; y los segundos, una Base de Datos ISA; no especifican cómo establecen los diferentes niveles de sensibilidad de los elementos expuestos, cómo se desarrolla el proceso de ponderación, ni su posterior inclusión y procesamiento en el SIG.

### 2.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está localizada en la Cuenca del Lago de Maracaibo, es de nuestro interés la línea de costa del lago, a partir del estrecho de Maracaibo hacia el sur, específicamente desde el puente sobre el estrecho o Puente Rafael Urdaneta (Figura 1). A continuación se hace una breve descripción de la misma basada en ICLAM (1991) donde expone que la Cuenca del Lago de Maracaibo, está limitada por la Sierra de Perijá al oeste y el flanco occidental de los Andes y la Serranía de Trujillo al este, ocupa una depresión tectónica de unos 52.000 kilómetros cuadrados de extensión; donde se han acumulado más de 10.000 metros de espesor de sedimentos cuyas edades se extienden desde el Cretáceo hasta el Reciente; constituye la cuenca petrolífera más rica de América del Sur. Tectónicamente, se relaciona con el levantamiento post-eoceno de la Sierra de Perijá y de la Cordillera de los Andes. El Lago de Maracaibo en si mismo tiene una

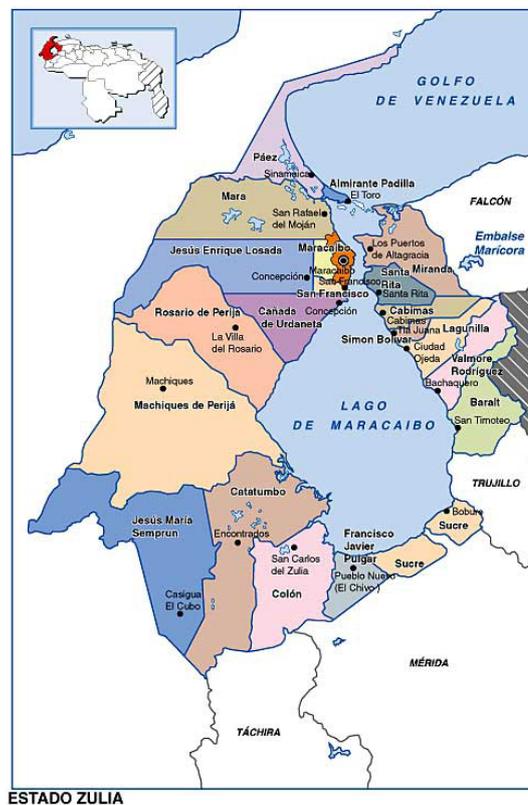


FIGURA 1. Línea de costa del lago, ubicación relativa nacional y regional.

longitud de 150 Km. en dirección N-S (entre los 9° 00' y los 10° 30' de latitud norte) y 110 Km en su parte más ancha en dirección O-E (entre los 71° 00' y 72° 20' de longitud oeste). Su profundidad media es de 25 m aproximadamente, con el valor máximo algo más de 32 m, en la porción sur-oriental, frente a La Ceiba.

Otro gran componente del sistema está constituido por los ríos tributarios. Los aportes de agua dulce de los ríos tributarios suman un gasto medio estimado de 2.017 m<sup>3</sup>/s, del cual un 80 % es aportado por los ríos que desembocan en la costa sur-occidental del lago (Catatumbo, Santa Ana, Escalante, área de drenaje directo Juan Manuel de Aguas Claras), fundamentalmente el Río Catatumbo, el cual aporta el 56,9 % del total de toda la cuenca. Esta descarga de agua ejerce una influencia considerable sobre el funcionamiento y limnología general del sistema del lago, en sus aspectos físicos, químicos y biológicos, influencia que afecta de alguna forma las sensibilidades a analizar en este trabajo. Para nuestros fines es necesaria una descripción de las costas. Esta clasificación abarca desde Sinamaica hasta la desembocadura

del Río Matícora, a escala 1:25.000. A esta escala, la medición de la longitud de las costas entre esos dos puntos, da un resultado de 1.155,5 Km. Se presenta un resumen de la clasificación de las costas en el cuadro 1.

Como se puede observar en el cuadro 1, en el ítem tipo de costa, existe un predominio de la costa tipo cenagosa, la cual sumada a la costa de tipo anegadiza suman 781,80 km (en la cual se incluyen Manglares, embriófitas, vegetación arbórea, arbustiva y herbácea (sumando 967,5 km), asignándole, para nuestros fines, la denominación *Manglares* (vegetación densa inundable); le sigue la costa urbanizada, a la cual, para nuestros fines, se puede igualar con las estructuras artificiales y asignarle la denominación *Urbano* (con una longitud de 327,35 Km); a continuación, la *Playa arenosa* (con 141,80 km) que incluye a Palmeras o cocoteros (en algunos casos tierras agropecuarias), dejándole esa denominación; por último, el Pantano estuarino, con 124 Km, asignándole la denominación *Ecosistema estuarino*, diferenciándola para los fines de este estudio del manglar, por la presencia de grandes ríos tributarios que llegan al lago.

#### CUADRO 1.

Clasificación de la costa del sistema Lago de Maracaibo, tomada de ICLAM (1991).

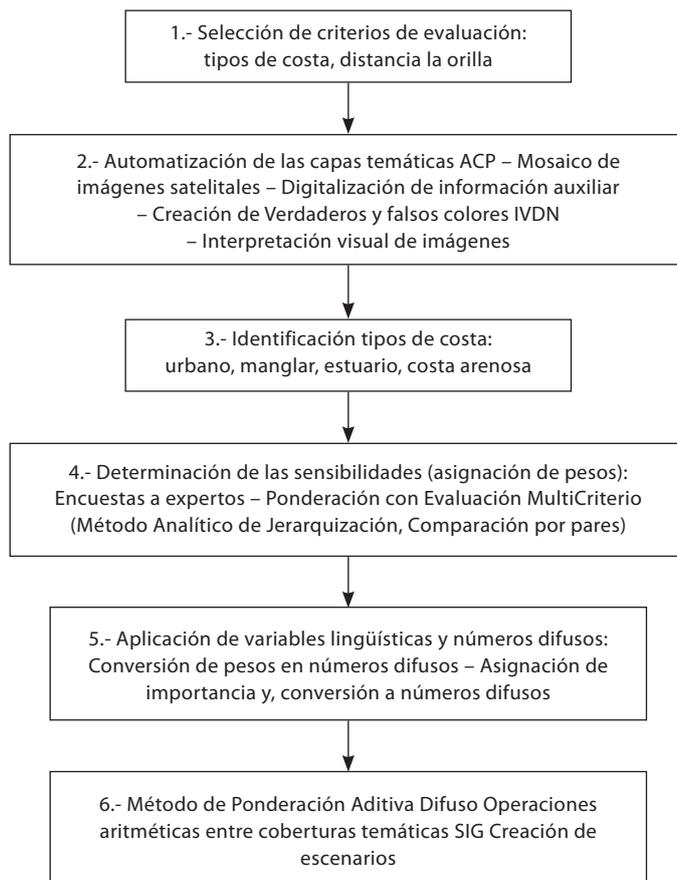
Tipos de costa	Longitud (km)	%
Urbanizada	241	20.86
Estructura artificial	86.35	7.48
Talud natural	53.45	4.63
Playa arenosa	141.80	12.28
Costa cenagosa	679.50	58.83
Costa anegadiza	102.20	8.85
Pantano estuarino	124.00	10.74
Médanos	56.90	4.93
Tipos de vegetación	km	%
Manglares	215.00	18.61
Otras embriófitas	102.10	8.84
Vegetación herbácea	231.50	20.04
Palmeras o cocoteros	134.50	11.64
Otra vegetación arbórea	267.70	23.18
Otra vegetación arbustiva	153.00	13.25

Se debe hacer notar que los tipos de costa Talud natural y Médanos no se consiguen en la línea de costa objeto de este estudio.

El ASA puede derivar en un *Índice de Sensibilidad Ambiental (ISA)*, el cual puede ser mapeado. El concepto original de mapeo del ISA, ante derrames petroleros, fue desarrollado para asistir a los coordinadores de la respuesta a un derrame, al evaluar el impacto potencial del petróleo a lo largo de la costa y la ubicación/ asignación de recursos durante y después del derrame (Jensen *et al.*, 1990).

Gutiérrez (2007), explora diferentes modalidades en la determinación de las sensibilidades, todas bajo el ambiente SIG. Inicialmente se escoge solamente el criterio "tipo de costa" y se ordenan jerárquicamente (Ordenación por rangos) las diferentes clases de costa. A continuación, al criterio tipo de costa se le

complementa con el "criterio distancia a la orilla" y se les asignan pesos de acuerdo a una escala preestablecida (Clasificación por rangos escalares) y se aplica la adición de coberturas. Luego, al criterio tipo de costa se le aplica la técnica Comparación por Pares (parte de la EMC), mediante encuesta a expertos para la asignación de pesos, y se hace adición con el criterio distancia a la orilla. Por último, utilizando los pesos generados se propone la aplicación del *Método de Ponderación Aditiva Difuso (MPAD)*, mediante el uso de *variables lingüísticas y números difusos*, generando de esta forma escenarios. Este último método es el propuesto en este documento. Obsérvese en la figura 2 un diagrama de flujo del modelo propuesto. A continuación se describen cada una de los componentes de la metodología propuesta.



**FIGURA 2.** Diagrama de flujo de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN QUE INTEGRAN EL MODELO ASA

Basados en la revisión bibliográfica, en la consulta con otros investigadores, la descripción del área de estudio y tomando en cuenta la escala de trabajo, se identificaron los criterios que se considera pueden ser útiles para definir la sensibilidad de la línea de costa ante un derrame petrolero. El primer criterio determinado es el “*Tipo de costa*”, es claro que en función de la clase de elementos presentes en la misma, sean naturales o antrópicos, estará definida su sensibilidad intrínseca, ya que estos mismos poseen una sensibilidad que les caracteriza. El segundo criterio propuesto como determinante en la sensibilidad de la costa, “*Distancia a la orilla*”, resultó en una etapa posterior al inicio de ésta investigación, una vez hechas las encuestas y habiendo intercambiado opiniones con otros investigadores. Se considera que éste segundo criterio puede influir en la sensibilidad definitiva de la línea de costa, factor que será explicado más adelante.

La identificación de los componentes ambientales de la línea de costa, y que se incluyeron en las encuestas entregadas a los expertos, se hizo basados en: 1. Los trabajos de Michel *et al.* (1978) y Jensen *et al.* (1990; 1993; 1998), en los que identifican y describen diferentes tipos de costas o componentes ambientales a ser afectados por derrames petroleros y sus respectivas vulnerabilidades; 2. En la descripción de los diferentes ecosistemas y componentes presentes en la línea de costa objeto de éste estudio (ICLAM, 1991; Hüber y Alarcón, 1988); 3. En el análisis previo e interpretación visual y tratamiento digital de las imágenes satelitales; y 4. Apoyados en los mapas de vegetación y de cartografía nacional.

## 2.3 CREACIÓN DE LAS CAPAS TEMÁTICAS Y AUTOMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una vez seleccionados los componentes que se considera pueden ser utilizados como elementos

representativos para evaluar la sensibilidad de la línea de costa, se procedió a crear las bases de datos que los describen, mediante técnicas digitales que son expuestas a continuación. Es bueno aclarar que al trabajar con imágenes satelitales es posible enfrentar el problema (identificación de tipos de uso y cobertura de la tierra) desde dos enfoques, uno básico que se refiere a la interpretación visual en pantalla, y otro más elaborado, el procesamiento digital para manipular la data y así facilitar la identificación de los elementos de nuestro interés. Se comienza el proceso seleccionando las bandas del satélite más adecuadas para hacer el análisis visual y procesamiento digital utilizando la técnica *Análisis de Componentes Principales (ACP)*, cuyo fundamento puede ser revisado en Gutiérrez (1999). La anterior técnica permitió preseleccionar las bandas 1, 2, 3, 4 y 5, como posibles participantes en la construcción de falsos colores, para resaltar los elementos bajo estudio, ya que poseen la mayor cantidad de información del juego de bandas.

Para la creación (y posterior procesamiento, interpretación y análisis) del mapa-imagen del área de estudio se procedió de la siguiente forma. Se hizo uso de dos fuentes de imágenes de satélite LANDSAT – ETM + <sup>®</sup>, la primera a partir de un mosaico ya existente, que se puede acceder en Internet (Imágenes MrSID<sup>®</sup>), del cual se hizo un corte o ventana (sub imagen) utilizando coordenadas geográficas. Se debe aclarar que esta sub imagen solamente sirve para hacer análisis visual de la misma, ya que es una composición en falso color, y no se dispone de las bandas que la componen. La segunda fuente corresponde a imágenes satelitales, pasos del satélite Landsat-ETM+ <sup>®</sup> 007-053 y 007-054, en formato Geotiff original y con todas sus bandas, a partir de las cuales se cortaron y unieron las sub imágenes, ya que el área de estudio abarcaba parte de las dos imágenes originales.

Seguidamente, se escanearon y georeferenciaron las hojas cartográficas de cartografía

nacional a escala 1:100.000, correspondientes al área de estudio, sobre éstas se digitalizaron en pantalla elementos contenidos en los mismos, como centros poblados, vías de comunicación, hidrografía, toponimia, etc. Es importante destacar que la información digitalizada, a partir de los mapas anteriormente nombrados, permite identificar algunos de los componentes que integran la línea de costa. Por ejemplo, mediante la superposición de la data urbana digitalizada sobre la imagen satelital se delimitan claramente los centros urbanos principales. Igualmente, una vez digitalizados los ríos principales se hace más fácil la identificación sobre la imagen satelital de los ecosistemas estuarinos, además de la utilización del IVDN.

## 2.4 GENERACIÓN DEL VERDADERO COLOR Y LOS FALSOS COLORES

Mediante la combinación de las diferentes bandas del LANDSAT-ETM+® se experimentó con los falsos colores 1A2V4R (Banda 1 en el cañón Azul del monitor, Banda 2 en el cañón Verde, Banda 4 en el cañón Rojo), 2A3V4R, 2A4V5R y 3A4V5R. Posteriormente, se hizo interpretación visual de las imágenes en verdadero y falsos colores para identificar preliminarmente los diferentes tipos de costa. Al observar los falsos colores 124 y 234, en los cuales la vegetación aparece en color rojo, se puede deducir claramente que el primero no es muy adecuado para la identificación o discriminación entre los usos y coberturas presentes en la línea de costa, ya que en él se manifiesta poca diferenciación en los tonos de rojo presentes.

En el falso color 234 se pueden discriminar más fácilmente los sectores cubiertos de vegetación de los sectores sin ésta, pudiéndose identificar la Ciudad de Maracaibo, en color verdoso, y la costa oriental del lago con la conurbación partiendo de Cabimas hacia el sur. Los falsos colores 245 y 345 permiten discriminar todavía más fácilmente entre áreas con

vegetación densa (verdes intensos) y sectores con ausencia de la misma o áreas urbanas (colores marrones claros y violetas claros) y así confirmar la presencia de sectores urbanos en la línea de costa, lo anterior se afirma apoyados en el conocimiento que se tiene del mapa topográfico, en el cual se pueden ubicar los sectores urbanos. Mediante la construcción de los falsos colores fue posible identificar, preliminarmente, algunos de los respectivos tipos de costa de nuestro interés, como sectores con y sin vegetación (suelo desnudo) y sectores urbanos.

## 2.5 APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (IVDN)

Con respecto a los cocientes entre bandas, incluido el IVDN, Chuvieco (1990) afirma lo siguiente: un cociente o ratio implica efectuar una división, píxel a píxel, entre los *Niveles Digitales* (ND) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Cuanto mayor sea el contraste entre los ND de las bandas infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada; bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño. Para nuestros fines, esta técnica nos ayuda a identificar el ecosistema Manglar, la vegetación densa y los ecosistemas ribereños, todos estos con presencia de vegetación fotosintéticamente muy activa.

En cuanto al IVDN, se procesaron digitalmente las imágenes utilizándolo con el objeto de resaltar zonas o sectores con alto contenido vegetal, esto es, los manglares, bosques ribereños o áreas inundables, para reforzar la interpretación visual inicial hecha con los falsos colores. Mediante esta técnica se pueden identificar preliminarmente zonas de manglares y de bosques ribereños en verde claro, y las áreas inundables se presentan como "islas" en color marrón hacia rojos.

## 2.6 IDENTIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE COSTA

De acuerdo a Hüber y Alarcón (1988) en la línea de costa de la cuenca existen los siguientes tipos de ecosistemas y usos de la tierra: Herbazales de pantano, Manglares ribereños, Bosques Ombrófilos siempreverdes, Arbustales Xerófilos espinosos, Bosques Xerófilos, Tierras agropecuarias y Costa Urbana (éstas dos últimas con playas arenosas asociadas); la anterior descripción es similar a la de ICLAM (1991). Para localizar áreas urbanas y las diferentes zonas o condiciones (manglares, costas de playas arenosas, áreas de estuarios) se procedió de la forma siguiente: el detalle de lo realizado depende en gran parte de la escala de trabajo que facilitan las imágenes satelitales, en el caso de LANDSAT-TM se puede afirmar que la escala es aproximadamente 1:25.000, ya que a ésta escala 1 cm representa 250 m, por lo tanto 1 mm equivale a 25 m, y en las imágenes LANDSAT-TM+® la resolución espacial (tamaño del píxel) es de 30 m, es decir, el tamaño del objeto más pequeño que se puede reconocer o discriminar.

El orden de delimitación estuvo dado por la facilidad de identificación de cada componente. Inicialmente se delimitó la costa urbana, por su localización rápida mediante los mapas topográficos y en las imágenes satelitales. La costa urbana incluye, entre otros, los centros poblados siguientes: Maracaibo, Cabimas, Ciudad Ojeda, Lagunillas, Bachaquero, Palmarito, La Ceiba. A continuación, se identificó la costa con manglar y bosques inundables, ayudados con las imágenes en falsos colores y la imagen NDVI, la cual fue muy útil en la identificación de estos sectores, ya que se pudo visualizar no solamente la intensidad en el verdor de la vegetación, sino también las intrusiones de cuerpos de agua, tanto de ríos como del lago. Incluida en los anteriores tipos de cobertura se discriminó el tipo de costa estuarios, ayudados por la presencia de grandes ríos que desembocan en el lago, como el Catatumbo, El Escalante y El Motatán. Por último, se delimitó la costa arenosa, para lo

cual se decidió que abarcaba el resto de la línea de costa.

## 2.7 DETERMINACIÓN DE LAS SENSIBILIDADES DE LOS COMPONENTES DE LA LÍNEA DE COSTA

Una vez seleccionados e identificados en la línea de costa los componentes que la describen, se procede a jerarquizarlos (ordenarlos, o ponderar su sensibilidad) de acuerdo a su influencia en la sensibilidad final. De la revisión de la literatura encontrada en el tema, se desprende que ninguno de los autores expone cómo se hizo la asignación de pesos, o porqué se asignó mayor o menor sensibilidad, a los componentes del medio a ser afectado, por parte de los expertos. Gutiérrez (2007), elaboró cuatro métodos que pueden ser utilizados para tal fin; los cuatro métodos son presentados con fines comparativos, y la propuesta del cuarto método, el más elaborado, *Método de Ponderación Aditivo Difuso* - MPAD (Fuzzy Additive Weighting Method - FAWM, Malczewski, 1999), se hizo en función de su facilidad de implementación, fundamentación teórica, y la posibilidad de ser utilizado en un ambiente de SIG.

Recordando lo afirmado por Jiang y Eastman (2000), y ampliando la idea, estos autores afirman que los enfoques o modelos utilizando operaciones booleanas y aritméticas tienen problemas fundamentales asociados a su uso. El primer problema tiene que ver con los diferentes métodos de agregación a ser utilizados, específicamente su lógica de agregación. El segundo problema tiene que ver con la normalización de los factores en la CLP. El tercer problema se relaciona al riesgo de decisión, lo cual puede ser considerado como la probabilidad de que la decisión será incorrecta. Los anteriores autores proponen entonces que se considere la toma de decisiones como un conjunto difuso de problemas y se resuelva mediante el uso de *medidas difusas y números difusos (fuzzy numbers)* para enfrentar los problemas planteados en la Evaluación Multicriterio.

La ventaja de la utilización de las medidas difusas estriba en el manejo del "riesgo" en la decisión, es decir: cómo decidimos que determinado componente ambiental es más o menos sensible?; por lo tanto es más o menos prioritaria su conservación?; cuánta área se va a dedicar a conservación o cuánta área se deja desprotegida?; cuál necesita más rápido las medidas de recuperación o limpieza?. Si se establece que es "más importante", resultaría en la asignación de más recursos de limpieza cercanos a éstas, si se establece que es "menos importante", resultaría en menos recursos de limpieza cercanos a éstas, esto nos permite el diseño de diferentes escenarios. Claramente, se pueden hacer las mismas consideraciones acerca del concepto de estar "cerca de" caminos, o en nuestro caso qué es "más sensible". En este caso, cuáles son áreas "muy sensibles, o "poco sensibles?. O, el criterio distancia a la orilla de costa es "más importante o menos importante" que el de la sensibilidad de los tipos de costa?.

Para resolver el anterior problema se propone el uso de los conceptos *Variables lingüísticas* y *Números difusos*, los cuáles serán explicados a continuación.

Según Malczewski (1999), un *número difuso* es un conjunto difuso definido en el dominio de los números reales. Se asume que tiene ambas propiedades de normalidad y convexidad. Son normales en el sentido que la máxima membresía de un conjunto difuso es 1.0. Se han sugerido números especiales difusos para simplificar el modelaje difuso bajo un ambiente SIG. Los más usados son de tipo trapezoidal, triangular, L - R trapezoidal, y L - R triangular. A menudo, estas categorías de números difusos se han denominado como funciones estándar de membresía (o números difuso estándar, normales). Aquí se expondrán solamente los números trapezoidales.

Esta categoría de número difuso tiene una estructura relativamente simple. Es importante resaltar que los números difusos trapezoidales

incluyen a los números ordinarios (1, 2, 3, ...), los números de intervalo, y los números triangulares. Se puede ver un ejemplo de número difuso trapezoidal en la figura 3. El número está designado como M, donde  $M = (a, b, \alpha, \beta)$ ; esto es, el número (0.1, 0.7, 0.3, 0.3) representa el trapezoide mostrado en la figura. Alternativamente, un número trapezoidal puede ser escrito como  $M = (a, b, c, d)$ . De acuerdo a esto, el trapezoide está representado por el siguiente número difuso L - R:  $M = (0.1, 0.4, 0.7, 1.0)$ . El concepto de número difuso proporciona la base para definir las *variables lingüísticas*. Específicamente, los números difusos son estados de una variable lingüística. Los estados son representados por conceptos lingüísticos como "muy corto", "medio", "largo", "muy largo", "muy pendiente", "pendiente", "pequeño", "grande". Estos conceptos están definidos en términos de una variable base, los valores de la cual son números reales dentro de un rango específico. Una variable base es variable en el sentido convencional, por ejemplo: distancia, pendiente, temperatura, humedad, precipitación, etcétera, sensibilidad en nuestro caso.

Los anteriores conceptos serán adaptados a la metodología propuesta, mediante la conversión en números difusos de las ponderaciones

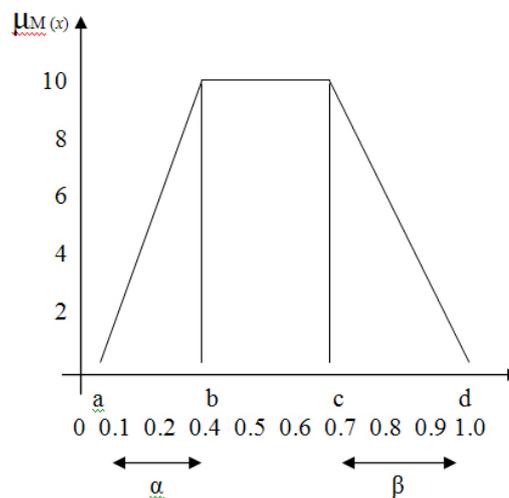


FIGURA 3. Número difuso trapezoidal  $M = (0.1, 0.4, 0.7, 1.0)$ , según Malczewski (1999).

(sensibilidades) obtenidas en las encuestas para los tipos de costa (Gutiérrez, 2007), y la asignación de pesos para el criterio "distancia al orilla"; así como la asignación de pesos para la importancia de los factores, que igualmente serán convertidos a números difusos. Una vez obtenidos los diferentes pesos difusos y creadas las coberturas temáticas respectivas, serán procesados mediante el MPAD, que será explicado a continuación. De acuerdo a Malczewski (1999) la idea detrás del MPAD es similar a la del método convencional *Ponderación Aditiva Simple* (Simple Additive Weighting, SAW), el cual es conocido también como *Combinación Lineal Ponderada* (Weighted Linear Combination, WLC). Ambos métodos utilizan el promedio ponderado como el operador de agregación. La diferencia entre ambos métodos es que el MPAD opera con data difusa, esto es, las entradas en la matriz de decisión y los pesos son especificados en términos de números difusos (Cuadro 2).

El método puede ser implementado en un ambiente SIG utilizando operaciones aritméticas difusas. Puede verse un ejemplo en el que se ilustra la implementación basada en SIG del método MPAD en Malczewski (1999). En este trabajo se establecieron dos criterios que influyen en la sensibilidad de la línea de costa ante un derrame petrolero, que son el tipo de

costa y la distancia a la orilla, ahora bien, el problema consistió en cómo implementar los conceptos variables lingüísticas y números difusos en éste modelo. Los anteriores conceptos se adaptaron al modelo desarrollado en este trabajo de la siguiente forma. En relación al tipo de costa, Gutiérrez (2007) diseñó una encuesta para conocer la opinión de expertos en cuanto a la sensibilidad de los componentes que se consideró influyen en los grados de sensibilidad de la línea de costa, tal encuesta incluye las variables lingüísticas, al asignarles pesos se pudo cuantificar en cierta forma la sensibilidad, dichas encuestas se procesaron estadísticamente para obtener valores promedios mediante el programa SIG utilizado para generar los pesos respectivos. Los pesos resultantes de las encuestas fueron: Manglar: 0.5889, Estuario: 0.2754, Urbano: 0.0884, Playa Arenosa: 0.0472

Tales pesos se transforman en números difusos, y con ellos se crean las respectivas coberturas temáticas SIG. Una vez identificados los tipos de costa y definido el corredor (exagerado para fines visuales), se procede a crear las diferentes coberturas y asignarles los valores convenidos. Modelo que se visualiza en la figura 4, y es explicado más adelante. El objetivo es evaluar la sensibilidad de la línea de costa, en función de dos criterios (tipo de costa y distancia

## CUADRO 2.

Conversión de términos lingüísticos a números difusos (Tomada de Chen y Hwang, 1992; en Malczewski, 1999).

Términos lingüísticos	Dos	Número de Tres	Términos Cinco	Lingüísticos Siete	Nueve
Muy bajo			0 - 0 - 0,1 - 0,2	0 - 0 - 0,1 - 0,2	0 - 0 - 0 - 0,1
Bajo a muy bajo					0 - 0 - 0,1 - 0,2
Bajo		0 - 0 - 0,2 - 0,4	0,1 - 0,25 - 0,25 - 0,4	0,1 - 0,2 - 0,2 - 0,3	0 - 0,2 - 0,2 - 0,4
Bajo a medio				0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5	0,2 - 0,35 - 0,35 - 0,5
Medio	0,4 - 0,5 - 0,5 - 0,8	0,2 - 0,5 - 0,5 - 0,8	0,3 - 0,5 - 0,5 - 0,7	0,4 - 0,5 - 0,5 - 0,6	0,3 - 0,5 - 0,5 - 0,7
Medio a alto				0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8	0,5 - 0,65 - 0,65 - 0,8
Alto	0,5 - 0,8 - 0,8 - 1	0,6 - 0,8 - 1 - 1	0,6 - 0,75 - 0,75 - 0,9	0,7 - 0,8 - 0,8 - 0,9	0,6 - 0,8 - 0,8 - 1
Alto a muy alto					0,7 - 0,9 - 1 - 1
Muy alto			0,8 - 0,9 - 1 - 1	0,8 - 0,9 - 1 - 1	0,8 - 1 - 1 - 1

a la orilla). Para el criterio “*Tipo de costa*”, la ponderación resultante de la opinión de expertos resultó en los anteriores pesos, estos pesos son transformados en números difusos. Tomando en cuenta los pesos generados, se establece que las variables lingüísticas que describen cada tipo de costa son las siguientes: Manglar (0,5889): extremadamente sensible, Estuarios (0,274): medianamente sensible, Urbano (0,0884): poco sensible, y Playa arenosa (0,0472): muy poco sensible. Lo anterior se convierte a números difusos basados en la escala de Chen y Hwang (1992) citados por Malczewski (1999) (Cuadro 2).

La escala fue modificada y adaptada para esta propuesta, tanto en el tipo de término lingüístico (ejemplo: muy sensible) como en el número de términos lingüísticos (cuatro, por ser cuatro los tipos de costa), y relacionándolos proporcionalmente a los números difusos correspondientes, para ajustarla a éste caso y presentada como propuesta. Lo que resulta en una escala de cuatro términos. Se presenta tal escala con el término lingüístico equivalente utilizado por Chen y Hwang (1992). Para los tipos de costa, los pesos transformados a números difusos se pueden observar en el cuadro 3. Para el criterio “*distancia a la orilla*” se propone lo siguiente, se considera “*cerca*” (menos de 40 m),

equivalente a “*muy sensible*”, se le asigna un peso de 0,8. Se considera “*lejos*” (de 40 a 100 m), equivalente a “*poco sensible*”, y se le asigna un peso de 0,2. Lo anterior se convierte a números difusos, para esto se adapta la escala de Chen y Hwang (1992), continuando con la variable lingüística “*Sensibilidad*”, y con dos términos lingüísticos, por ser dos las situaciones a evaluar (Cerca: menos de 40 m, y Lejos de la costa: entre 40 y 100 m), resultando en una escala de dos términos. Para “*Distancia a la orilla*” se presentan a continuación los pesos transformados a números difusos (Cuadro 4).

Una de las ventajas del modelo propuesto es que permite ponderar la importancia que se le asigna a cada uno de los criterios utilizados, es decir, es posible que en función de sus características intrínsecas, cada criterio ejerza diferente influencia en la determinación de la sensibilidad de la línea de costa. Por lo tanto, se considera que ambos criterios tienen diferente importancia en la evaluación de la sensibilidad, como propuesta para éste modelo, se considera que el “*tipo de costa*” es “*muy (A)*” importante, y la “*distancia a la orilla*” es “*medianamente (M)*” importante (W: A, M). Lo anterior se convierte en números difusos (escala de dos términos). Para la “*Importancia*” de ambos criterios se crean los siguientes números difusos (Cuadro 5).

Tipo costa	Pesos	Términos lingüísticos	Números difusos
Manglar	0.5889	Extremadamente sensible (Muy alto)	(0,8 – 0,9 – 1 – 1)
EcEstuario	0.2754	Medianamente sensible (Medio)	(0,3 – 0,5 – 0,7 – 0,7)
Urbano	0.0884	Poco sensible (Bajo)	(0,1 – 0,25 – 0,25 – 0,4)
PArenosa	0.0472	Muy poco sensible (Muy bajo)	(0 – 0 – 0,1 – 0,2)

**CUADRO 3.**

Conversión de pesos por tipo de costa a términos lingüísticos y números difusos.

Distancia a la orilla	Pesos	Términos lingüísticos	Números difusos
Menos de 40 m (Cerca)	0,8	Muy sensible (Alto)	0,6 – 0,8 – 1 – 1
De 40 a 100 m (Lejos)	0,2	Poco sensible (Bajo)	0 – 0 – 0,2 – 0,4

**CUADRO 4.**

Asignación de pesos “*Distancia a orilla*” y conversión a números difusos.

### CUADRO 5.

Asignación de pesos a "Importancia de cada factor" y conversión a números difusos.

Criterio	Pesos	Términos lingüísticos	Números difusos
Tipo de costa	0,7	Muy importante	(0,5 – 0,8 – 0,8 – 1)
Distancia a la orilla	0,3	Medianamente importante	(0,4 – 0,5 – 0,5 – 0,8)

Una vez asignadas las ponderaciones respectivas a los criterios (tipo de costa y distancia a la orilla), creados sus números difusos respectivos, así como asignadas también la ponderación a la "Importancia" que tiene cada criterio, y creados sus respectivos números difusos, se procede a la construcción de las respectivas coberturas temáticas y a las operaciones aritméticas, ya descritas anteriormente mediante ejemplo (Malczewski (1999), para generar el resultado final de las sensibilidades para cada sector y escenario. Se crean entonces 4 juegos de capas (4 números difusos) para cada criterio (tipo de costa y distancia a la orilla), se multiplican (\*) por sus respectivos pesos de importancia, posteriormente se suman (+) cada una, esto genera 4 juegos de capas finales (4 números difusos), generalmente la cobertura final "d", es la de valores más altos, o las sensibilidades mayores en este caso.

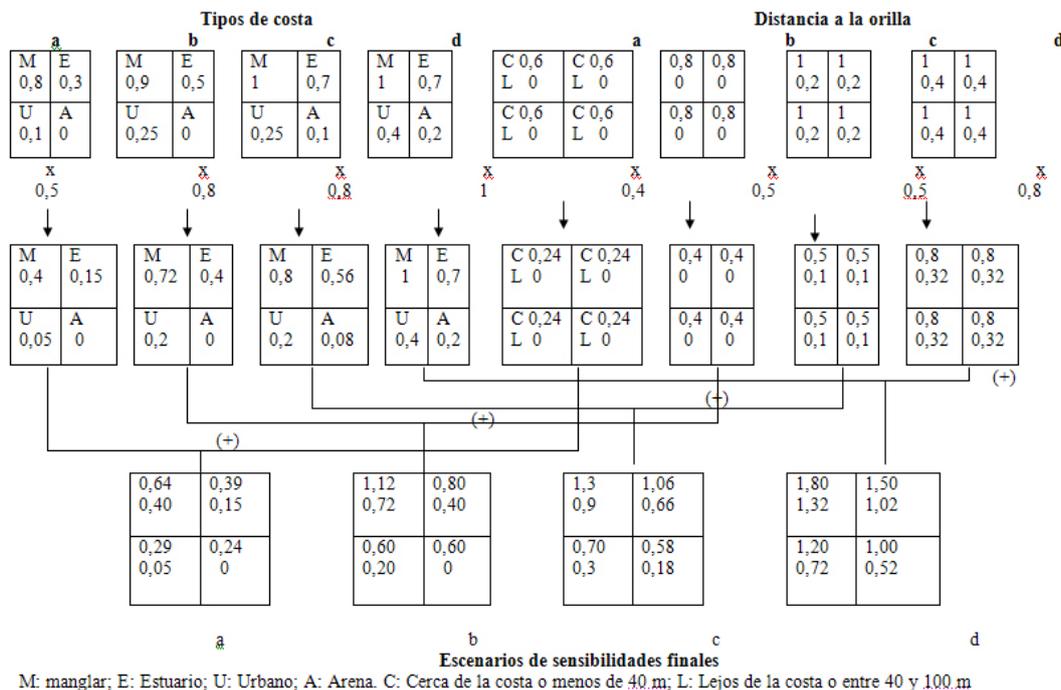
Para los tipos de costa se crearon 4 capas (capa Costa a, Costa b, Costa c y Costa d), a cada polígono (sea de manglar, estuario, urbano o arena) se les asignan sus diferentes pesos difusos. Se multiplica cada capa (a, b, c, d) por sus respectivos pesos de importancia (Costa a x 0,5; Costa b x 0,8; Costa c x 0,8; Costa d x 1), se procede igual para b, c y d. Igualmente, para la distancia a la orilla se crean 4 capas (capa Dist a, Dist b, Dist c, Dist d), a cada polígono (menos de 40 m, y entre 40 y 100 m) se les asignan sus diferentes pesos difusos. Se multiplica cada capa (a, b, c, d) por sus respectivos pesos de importancia (- 40 a x 0,4; - 40 b x 0,5; - 40 c x 0,5; - 40 d x 0,8), igualmente para b, c y d. Se suman ambos criterios, tipo de costa más (+) distancia a la orilla, para cada número difuso (a, b, c, d) y se obtienen las sensibilidades finales.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez desarrollado el proceso metodológico, se obtuvieron los siguientes resultados. El diseño del modelo final se presenta en la figura 4. De acuerdo a la interpretación visual de las imágenes satelitales, al procesamiento digital de las mismas y apoyados en los mapas de vegetación y topográficos, se identificaron los usos y coberturas que caracterizan la línea de costa del área de estudio, resultando los siguientes tipos y sus extensiones: Tipo de Costa Arenosa: 208 Km; Tipo de Costa urbana: 128 Km; Tipo de Costa de Manglar: 70 Km; Tipo de Costa Estuarina: 54 Km.

Habiendo identificado los tipos de costa, y diseñado el modelo final a ejecutar, se crearon las coberturas requeridas. Al utilizar la EMC, se generaron pesos mediante encuesta a expertos, para conocer los niveles de sensibilidad de los tipos de costa, utilizando el método de las Jerarquías Analíticas mediante la comparación por pares, obteniéndose los pesos siguientes, presentados de forma decreciente en magnitud: Manglar: 0.5889; Ecosistema Estuarino: 0.2754; Costa Urbana: 0.0884; Playa arenosa: 0.0472. Se puede observar que las ponderaciones dadas por los expertos asignan un peso mayor al manglar, quizás pueda afirmarse que era de esperar, ya que sabemos que los manglares son un ecosistema muy frágil e importante, porque posee especies muy especializadas y adaptadas a tales condiciones, así como que es el lugar de desove de los peces.

El segundo mayor peso fue asignado a los ecosistemas estuarinos, igualmente con especies especializadas, aunque con presencia de ríos grandes que desembocan en el lago, lo que hace que el sistema pueda sostener en cierta forma



**FIGURA 4.** Esquema del modelo final de sensibilidades con los respectivos escenarios (a, b, c, d).

un mecanismo de renovación o limpieza, lo que lo haría menos vulnerable a un derrame. Recordemos que Michel *et al.* (1978) colocan a los estuarios como los más sensibles en su escala propuesta para un área de estudio que no presenta manglares. Las dos anteriores ponderaciones (Manglar y Estuarios) están de acuerdo con el principio de que mientras un ecosistema esté menos intervenido será más sensible.

El tercer peso fue asignado a las costas urbanas, como se sabe las comunidades siempre tendrán rechazo a los efectos negativos contaminantes del petróleo, además del efecto antiestético del mismo. Recordemos que entre los efectos negativos del petróleo están:

degradación de las playas, las instalaciones costaneras y los botes por los derrames de petróleo y los desechos (impregnación, bolas de alquitrán, basura y restos provenientes de las instalaciones costa afuera y del transporte), así como la pérdida o reducción de las áreas de pesca artesanal o recreativa y sitios turísticos. Elementos claves de una costa urbana y por lo tanto un factor con influencia en la decisión de definir su sensibilidad.

Recordando, cada cobertura final (a, b, c, d) se interpreta de la siguiente forma en el cuadro 6.

Por último, se encuentran con el menor peso las playas arenosas (las que no estén asociadas a zonas urbanas), ya que se pudiera

Manglar cerca de la costa (hasta 40 m) Manglar lejos de la costa (entre 40 y 60 m)	Estuario cerca de la costa (hasta 40 m) Estuario lejos de la costa (entre 40 y 60 m)
Urbano cerca de la costa (hasta 40 m) Urbano lejos de la costa (entre 40 y 60 m)	Arena cerca de la costa (hasta 40 m) Arena lejos de la costa (entre 40 y 60 m)

**CUADRO 6.** Interpretación de pesos generados en las coberturas finales (a, b, c, d).

afirmar, además de la facilidad de su limpieza (en un todo de acuerdo con Jensen *et al.*, 1990), no tienen la presión de las comunidades urbanas, aunque siempre causan preocupación si éstas son utilizadas para recreo, y tengan presencia de comunidades rurales o pesquerías, lo que redundaría en un aumento del peso asignado a su sensibilidad. El modelo propuesto permite incluir, de ser necesario, estos otros posibles actores en la toma de decisiones. Para complementar el diagnóstico se añadió, a partir del segundo modelo, el factor distancia a la orilla, lo que permite determinar las diferentes sensibilidades de forma más fundamentada y completa.

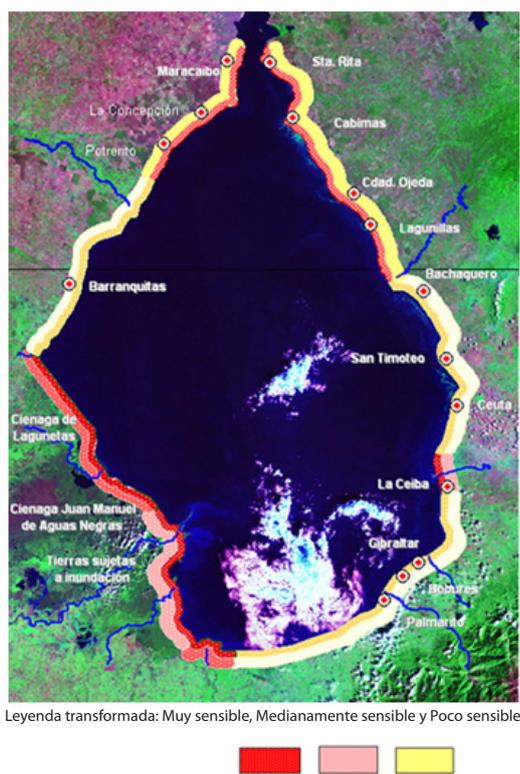
Posteriormente, mediante el MPAD, se desarrolló el modelo de decisión final utilizando números difusos y variables lingüísticas, aplicado a las reglas de decisión, lo que permitió construir una estructuración del modelo que hace posible la visualización de escenarios, en este caso, mapas que representan diferentes

importancias o pesos en los distintos sectores bajo estudio, y por lo tanto diferentes sensibilidades, para de ésta manera elegir los que se consideren más adecuados a los intereses de los actores involucrados. Al aplicar el método se generan cuatro coberturas temáticas finales de sensibilidad, mapas: a, b, c y d.

Pueden revisarse los resultados de las coberturas a, b, c y d en la figura 4 y en Gutiérrez (2007). Por observación del modelo matemático (Figura 4) se nota que la cobertura "d" es la que tiene los mayores valores, entonces se puede escoger ésta cobertura como resultado final (en la realidad esta selección se debe hacer por consenso), del cual se extraen las sensibilidades definitivas, que son las que se les asignan a los diferentes sectores que componen la línea de costa, tanto por tipo de costa como por distancia a la orilla. Puede observarse la cobertura resultante con degradación de color para los diferentes niveles de sensibilidad en la figura 5

Si se selecciona la cobertura "d" como valores definitivos, los resultados son los siguientes: el tipo de costa más sensible es el manglar, en sus primeros 40 m a lo largo de la costa (con un valor de 1,8); le sigue el ecosistema estuarino cerca de la orilla (1,5); después el manglar entre 40 y 100 m costa adentro (1,32); a continuación está la costa urbana cerca de la orilla (1,2), le sigue el estuario costa adentro (1,02); a continuación está la playa arenosa cerca de la orilla (1,0); posteriormente la costa urbana lejos de la orilla (0,72); y por último la playa arenosa lejos de la orilla (0,52).

Como se afirma anteriormente, las cuatro coberturas finales (a, b, c, d) corresponden a escenarios, es decir, mediante la manipulación de la información de entrada se pueden cambiar las sensibilidades de salida definitivas. Lo anterior se logra cambiando las variables lingüísticas (tomando en cuenta los pesos y la importancia) y por lo tanto los números difusos resultantes. Esto permite tomar en cuenta las variaciones espaciales (por ejemplo



**FIGURA 5.** Imagen satelital en verdadero color con sensibilidades finales generadas de la de costa.

modificación de los tipos de costa por cambios de uso y cobertura), temporales (cambios de opinión en la importancia dada a cada criterio por modificación de un interés determinado) o la inclusión de otro actor en el proceso, eventos que acontecen en todo proceso de toma de decisiones. Es bueno aclarar que el modelo MPAD permite generar los escenarios anteriores, con los que al momento de decidir, se debe llegar a un consenso en el caso de haber conflictos de intereses entre los actores interesados en el proceso.

Finalmente, trabajando sobre la cobertura "d", se pueden establecer rangos para definir niveles de sensibilidades, para los sectores sobre la línea de costa, pudiendo ser estos los siguientes: poco sensible de 0 hasta 1 (este valor incluye la playa arenosa, cerca y lejos, y lo urbano lejos); medianamente sensible desde 1 hasta 1,5 (incluyendo al estuario lejos, la costa urbana cerca y manglar lejos); y muy sensible desde 1,5 hasta 2 (en el que se incluyen el ecosistema estuarino cerca y el manglar lejos). Los porcentajes de línea de costa clasificados, sobre la orilla, según su sensibilidad, son de la forma siguiente: de un total de 460 kms, 124 kms (26 %) fueron clasificados como muy sensibles (Manglares y Estuarios), 128 kms (27 %) como medianamente sensibles (Costa Urbana), y 208 kms (45 %) como poco sensibles (Playa arenosa).

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede notar que el modelo posee la ventaja de incluir un método de asignación de pesos mejor sustentado, en vista del uso de la opinión de expertos de forma consistente para la ponderación de la sensibilidad de los tipos de costa. Además, el MPAD permite manipular los respectivos pesos e importancias mediante el uso de las variables lingüísticas y números difusos, lo que es notable sabiendo que la realidad del área de estudio puede cambiar en tiempo y espacio. Por ejemplo, los usos y

coberturas pueden sufrir cambios, lo que modifica sus características, y por lo tanto puede hacer cambiar la opinión de uno o más expertos en un momento dado. En adición, se pueden incluir opiniones de otros actores interesados en el proceso de la toma de decisión, lo que modificaría pesos e importancias, y por lo tanto los niveles de sensibilidad.

Lo anterior permite afirmar que el método facilita la *creación de escenarios*, ya que modificando las variables lingüísticas se modifican los números difusos y por lo tanto los resultados finales en cuanto a grados de sensibilidad. El modelo final en sí ofrece diferentes opciones, ya que se crean cuatro capas (mapas) finales de sensibilidad, de ésta forma los actores interesados pueden escoger la que consideren más conveniente a sus campos de acción. Es decir, un actor que represente intereses de la sensibilidad de la población urbana; un Alcalde por ejemplo, escogería un determinado escenario en el que se asigne alta sensibilidad a la costa urbana; otro actor que represente intereses del sector de conservacionista, como los biólogos, puede escoger que el escenario que asigne la más alta sensibilidad a los manglares o estuarios. Igualmente, un actor que represente el sector turístico, por ejemplo empresarios hoteleros, puede escoger un escenario en el que se asigne más sensibilidad a las playas.

Lo anterior se resuelve con *soluciones compromiso*, cada actor debe reconocer qué tanto puede ceder en su posición, esto es parte de la realidad en un proceso de toma de decisión en el cual participan diferentes actores, se toman decisiones por consenso, entonces se escoge la cobertura que represente tal consenso (a, b, c, ó d), por lo tanto el modelo se caracteriza por representar más eficazmente tal realidad.

El modelo con los escenarios resultantes se crea en función de los componentes de la línea de costa que la describen, además de los grupos de interés que participen en el proceso de construcción del mismo. De haber cambios en el

tiempo y espacio en el ambiente bajo análisis, cambios de opinión en los grupos de interés, o aparición de otros interesados, tales cambios pueden ser incluidos en el modelo y generar resultados finales diferentes. Recordando a Salazar (1999), sobre las características exigidas para los índices, en el sentido de que debe ser fácil de usar, debe representar la información de los indicadores, debe ser aceptado por los expertos en evaluación, no debe ser ambiguo, debe reflejar cambios en los indicadores claves o de más valor de ponderación, y debe permitir la determinación de tendencias de cambio a nivel espacial y temporal. Pensamos que el índice propuesto cumple con tales exigencias.

Recapitulando el proceso metodológico se resalta que Gutiérrez (2007) desarrolló 4 modelos para analizar la sensibilidad; en este trabajo se describe el último, el MPAD. Cada modelo representa las sensibilidades de la línea de costa, pero, como afirma Canter (1997) la ponderación o la asignación de pesos es crucial al momento de querer determinar las diferentes sensibilidades de la línea de costa, por lo tanto, ésta propuesta metodológica se considera la más elaborada y eficiente, demostró ser la mejor fundamentada teóricamente, ya que hace énfasis en el uso de técnicas que ayuden a mejorar el proceso de toma de decisiones, aprovecha los pesos generados con la EMC, tomando en cuenta además el grado de facilidad de uso y comprensión por parte del usuario, la posibilidad de aplicarse bajo SIG y, por último, del hecho de su flexibilidad al ser desarrollado bajo el concepto de *Lógica Difusa* (números difusos), aplicada a las reglas de decisión, lo que permite la creación de escenarios.

Se recomienda su utilización en actividades de gestión ambiental en las que se daba trabajar con equipos multidisciplinarios y diferentes actores interesados en las decisiones, ya que su flexibilidad permite reflejar cambios en los intereses y en los factores ambientales involucrados.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El autor Julián Gutiérrez agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Venezuela (CONICIT, actual FONACYT), por beca-crédito para cursar estudios doctorales, cuyo producto final, tesis doctoral, es la base de este artículo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARREDO, J. 1996. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Editorial RA-MA. Madrid, España. 264 p.
- CANTER, L. 1997. *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental: Técnicas para la elaboración de estudios de impacto*. Editorial Mc Graw Hill. Madrid, España. 841 p.
- CARVER, S. 1991. Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 5. (3): 34-51.
- CHUVIECO, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Editorial RIALP, Madrid, España. 453 p.
- EASTMAN, J. R., W. JIN, P.A. KYEM, P. A. y J. TOLEDANO. 1995. Raster Procedures for Multi-criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 6 (5): 67-77.
- GUTIÉRREZ, J.A. 1999. Evaluación de la dinámica de la cobertura vegetal y uso de la tierra utilizando imágenes de satélite y SIG, Cuenca del Río Mucujún, Estado Mérida. Trabajo de grado para optar al Magister en Manejo de Cuencas. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes, Venezuela. 79 p.
- GUTIÉRREZ, J.A. 2001. Modelo para la selección y priorización de áreas a reforestar en los alrededores de la ciudad de Mérida, Venezuela, utilizando Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de

- Evaluación Multicriterio. Trabajo de grado para optar al Magister en Manejo de Bosques. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Venezuela. 123 p.
- GUTIÉRREZ, J.A. 2007. Diseño de un modelo de análisis de sensibilidad ambiental bajo Sistemas de Información Geográfica. Tesis Doctoral. Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Venezuela. 194 p.
- HUBER, O. y C. ALARCÓN. 1988. *Mapa de Vegetación de Venezuela*. Ministerio del Ambiente de los Recursos Naturales Renovables. República de Venezuela. 52 p.
- ICLAM. 1991. *Plan Maestro para el control y manejo de la calidad de las aguas de la Cuenca del Lago de Maracaibo*. Instituto para la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Maracibo, Venezuela. 283 p.
- JANKOWSKI, P. 1995. Integrating Geographical Information Systems and Multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems* 9 (3): 87-98.
- JENSEN, J. R., E. RAMSEY, J. HOLMES, J. MICHEL, B. SAVITSKI y B. DAVIS. 1990. Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographic information system technology. *International Journal of Geographic Information Systems* 4(2): 39-54.
- JENSEN, J. R., S. NARUMALANI, O. WEATHERBEE, M. MURDAY, W. SEXTON y C. GREEN. 1993. *Coastal Environmental Sensitivity Mapping for Oil Spills in the United Arab Emirates using Remote Sensing and GIS technology*. Geocarto International (2) 1993. 281 p.
- JENSEN, J. R., J. HALLS, J. Y J. MICHEL. 1998. A systems approach to Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping for oil spill contingency planning and response. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64 (10): 23-42.
- JIANG, H. E. y J.R. EASTMAN. 2000. Application of Fuzzy measures in multicriteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Science* 14 (2): 36-49.
- MALCZEWSKI, J. 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Department of Geography. University of Western Ontario. John Wiley and Sons, Inc. 391 p.
- MARTÍNEZ, R., J. TABOADA, C. ORDÓÑEZ y J. LANAJA. 2000. *Análisis multicriterio para la selección de emplazamientos de vertederos de residuos sólidos en el entorno de Valladolid*. Mapping. No. 60. Madrid, España. 267 p.
- MICHEL, J., M. HAYES y J. BROWN. 1978. Application of an Oil Spill Vulnerability Index to the shoreline of Lower Cook Inlet, Alaska. *Environmental Geology* 2 (2): 107-117.
- PEREIRA, J. y L. DUCKSTEIN. 1993. A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International Journal of Geographical Information Systems* 7 (5): 105-119.
- SALAZAR, J. 1999. Índices e Indicadores para evaluación y seguimiento ambiental. En línea: <http://usuarios.lycos.es/JuanP/impac.htm> [Consultado: 11/05/2010].
- SANDIA, L. y J. ROA. 1990. *Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto carretero Mérida-Panamericana*. Trabajo especial de grado para optar al título de Geógrafo. Escuela de Geografía. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 239 p.