



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS**

**DISEÑO DE UN MODELO DE**  
**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL**  
**BAJO**  
**SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Tesis presentada como requisito parcial para optar al grado de  
**DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS**

INFORMACION

**Autor: Julián A. Gutiérrez L.**

**Tutor: Dr. Hervé Jegat**

SERBULA  
Tullio Pedroso Cordero

**Mérida, Venezuela, 26 de Octubre de 2.007**

	CONTENIDO	Pag
	Índice general	I
	Índice de figuras – Índice de cuadros y tablas	III
	Resumen	IV
	Abstract	V
	Agradecimientos y dedicación	VI
<b>1ra parte</b>	<b>Introducción. Capítulo I: Marco teórico.</b>	1
	<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
	Planteamiento del problema	8
	Importancia	9
	<b>CAPITULO I: MARCO TEÓRICO</b>	11
I.1	Sobre Sistemas de Información Geográfica	11
I.1.1	Breve historia y evolución de los SIG.	11
I.1.2	SIG: Definición y Componentes	11
I.1.3	Estructura de los SIG y Capas Temáticas	12
I.1.4	Funciones, Operaciones y análisis de datos en los SIG	13
I.1.5	Aplicaciones de los SIG	14
I.2	El Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA)	15
I.2.1	Metodologías de Análisis de Sensibilidad Ambiental	19
I.2.1.1	Índice ambiental del medio: Sensibilidad y Diversidad Ecológica	21
I.2.1.2	Estudio de Factores y Componentes medioambientales	23
I.2.1.3	Indicadores e Índices	31
I.2.2	Antecedentes de ASA	37
I.3	Métodos de Ponderación	43
I.3.1	Consulta tipo Delphi	44
I.3.2	Ordenación por rangos (Ranking methods)	44
I.3.3	Clasificación por rangos escalares (Rating methods)	45
I.3.4	Comparación por Pares (Pairwise comparison)	45
I.3.5	Ordenación y Comparación por Pares (Comparación en pares jerarquizados)	45
I.3.6	Técnicas de Evaluación Multicriterio (TEMC)	46
I.3.6.1	Componentes de la EMC	47
I.3.6.2	Métodos de EMC	52
I.3.6.3	Método Analítico de Jerarquización (“Analytical Hierarchy Process”)	55
I.3.7	Comparando los métodos	61
I.4	Calidad de la información geográfica	62
I.5	Teoría de la Lógica Difusa y Conjuntos difusos	67
<b>2da parte.</b>	<b>Técnicas y métodos</b>	75
	<b>CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LA ACTIVIDAD PETROLERA</b>	76
II.1	Descripción del Área de estudio: la Cuenca del Lago de Maracaibo	76
II.1.1	Descripción de la cuenca y el sistema del lago	77
II.1.2	Ríos tributarios y cuenca hidrográfica del sistema Lago	78
II.1.3	Ecología del sistema del Lago	81
II.1.4	Ecosistemas y componentes que describen la línea de costa del área de estudio	83
II.1.5	Poblaciones presentes en la línea de costa	84

II.2	Descripción de los tipos de costa presentes en el área de estudio	84
II.2.1	Ecosistemas marinos costeros	84
II.2.1.1	Descripción del ecosistema Mangle	85
II.2.1.2	Descripción del Bosque Inundable	88
II.2.1.3	Características de los estuarios relacionadas con la contaminación	88
II.2.1.4	Descripción de las Playas	90
II.2.2	Descripción de la costa urbana	91
II.3	El Petróleo	92
II.3.1	La actividad petrolera costa afuera. Impactos ambientales potenciales	93
II.3.2	Planes contingentes para un derrame de petróleo	95
	<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL</b>	96
III.1	Modelaje tradicional usando Sistemas de Información Geográfica	96
III.2	Selección de los criterios (condiciones, tipos de costa) de evaluación a integrar el Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA)	102
III.3	Creación de las capas temáticas y automatización de la información	103
III.3.1	Análisis de Componentes Principales para la selección de las bandas a utilizar	104
III.3.2	Creación del mosaico de imágenes satelitales, corte y georeferenciación de las subimágenes. Digitalización de información auxiliar	108
III.3.3	Generación del verdadero color y los falsos colores	112
III.3.4	Aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN).	116
III.3.5	Identificación de los tipos de costa	117
III.4	Determinación de las sensibilidades de los componentes de la línea de costa	125
III.5	Modelo de Ordenación por rangos	126
III.6	Modelo de adición utilizando dos criterios	127
III.6.1	Creación de un corredor (Buffer) de 100 m a partir de la línea de costa	128
III.7	Modelo de adición con dos criterios y aplicando Evaluación Multicriterio	131
III.7.1	Diseño, aplicación y análisis de la encuesta	133
III.7.2	Cálculo de los pesos	136
III.7.3	Operación de adición	138
III.7.4	Análisis y comentarios de los resultados	139
III.8	Modelo aplicando EMC, Variables lingüísticas y Números Difusos	140
III.8.1	Utilización de las medidas difusas en las reglas de decisión	140
III.8.2	Método de Ponderación Aditiva Difuso (MPAD)	145
III.8.3	Análisis de sensibilidad del modelo y Manejo del riesgo en la decisión	154
III.8.4	Aplicación de la Lógica Difusa en la clasificación supervisada de imágenes satelitales	162
	<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	169
IV.1	Resultados, interpretación y análisis	169
IV.2	Utilización de la banda pancromática con las diferentes sensibilidades superpuestas	177
	<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	180
V.1	Conclusiones	180
	Recomendaciones	182
	Referencias bibliohemerográficas	185
	Anexos	192

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>		
Figura I.1.	Funciones y Operaciones de los SIG	13
Figura I.2	Integración SIG-EMC	48
Figura I.3	Clasificación de técnicas EMC	53
Figura I.4	Matriz de Comparación por Pares	57
Figura I.5	Matriz de comparación por pares con Vector propio principal	58
Figura I.6	Factores, Vectores propios calculados y normalizados	59
Figura I.7	Funciones de membresía de Conjuntos Difusos vs de Conjuntos Precisos	68
Figura II.1	Ubicación relativa nacional	79
Figura II.2	Subimagen satelital del Lago de Maracaibo	80
Figura III.1	Diagrama de flujo de la metodología propuesta	101
Figura III.2	Componente 1 y Banda 2	107
Figura III.3	Mosaico de imagen LANDSAT-TM+ en falso color	109
Figura III.4	Mosaico en verdadero color a partir de imágenes en formato Geotiff	110
Figura III.5	Coberturas vector (vías, centros poblados, hidrografía) sobrepuestas al mosaico del área de estudio	111
Figura III.6	Composiciones en falsos colores	113
Figura III.7	Acercamientos para identificar áreas urbanas en falsos colores 124 y 234	114
Figura III.8	Acercamientos para identificar áreas urbanas en falsos colores 245 y 345	115
Figura III.9	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del área de estudio	118
Figura III.10	Acercamiento en la imagen NDVI en zonas de manglares y bosques inundables	119
Figura III.11	Tipos de costa identificados ("buffers") sobre imagen en falso color	121
Figura III.12	Vista de costa urbana	122
Figura III.13	Vista de costa urbana	123
Figura III.14	Vista de costa de manglar	124
Figura III.15.	Vista de costa estuarina	124
Figura III.16	Vista de costa de tipo arenosa	125
Figura III.17	Modelo de adición con dos criterios y pesos asignados	131
Figura III.18	Modelo de adición con dos criterios y pesos calculados con EMC	139
Figura III.19	Numero difuso trapezoidal $M = (0.1, 0.4, 0.7, 1.0)$	144
Figura III.20	Esquema del modelo final de sensibilidades con los respectivos escenarios (a, b, c, d)	153
Figura III.21	Sector de transición entre costa arenosa (con terrenos agrícolas) y costa de manglar y su clasificación supervisada "dura"	166
Figura III.22	Clasificación "suave" con firmas difusas de sector con costa arenosa (con tierras agrícolas) y manglar	167
Figura IV.1	Sensibilidades finales de la línea de costa	178
Figura IV.2	Consulta al SIG en pantalla	179

<b>ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS</b>		
Cuadro II.1	Clasificación de las costas del sistema Lago de Maracaibo	83
Cuadro III.1	Matriz de Varianza/Covarianza de las bandas	106
Cuadro III.2	Matriz de Correlación entre bandas	106
Cuadro III.3	Porcentaje de información contenida en cada componente	106
Cuadro III.4	Correlación entre componentes y bandas	107
Tabla III.1	Tabla de conversión de términos lingüísticos a números difusos	152
Tabla III.2	Resultados con pesos de la "Importancia" de criterios modificados	158

## RESUMEN

Se propone un procedimiento metodológico para el diseño de un modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA) 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. Se desarrollan y comparan cuatro métodos, (1) Ordenación simple, (2) Adición simple de coberturas con dos criterios, (3) Adición simple complementado con técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), para la generación de pesos (niveles de sensibilidad) mediante opinión de expertos ambientales utilizando comparación por pares, y (4) el método definitivamente propuesto, denominado “Método de Ponderación Aditiva Difusa (MPAD)”, utilizando parcialmente la Teoría de Lógica Difusa, específicamente los Números Difusos.

Se utilizó la Lógica Difusa para dos fines, primero, para la estructuración de las reglas de decisión del modelo, utilizando números difusos y variables lingüísticas; segundo, como una propuesta, en la clasificación supervisada de las imágenes satelitales. 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 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).

Al comparar los resultados de los cuatro modelos, resultó mejor el MPAD, complementado con técnicas de EMC, el cual demostró ser el más robusto y preciso, 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.

**Palabras claves:** Análisis de Sensibilidad Ambiental, Derrames petroleros, Sistemas de Información Geográfica, Técnicas de Evaluación Multicriterio, Números Difusos, Imágenes satelitales, Lago de Maracaibo, Venezuela.

## ABSTRACT

Is proposed a methodological procedure to design a model of Environmental Sensitivity Analysis (ESA) was designed under Geographic Information Systems (GIS), to identify sensitivity levels in four environmental components facing a potential oil spill, along the shoreline of Maracaibo Lake, Venezuela. Four methods were developed and compared: (1) Simple hierarchyzation, (2) Addition of layers with two criteria, (3) Simple Additive Weighting (SAW), with Multicriteria Evaluation (MCE) Techniques for weight (levels of sensitivity) yielding by environmental expert's opinion using a pairwise comparison method, and, (4) Fuzzy Additive Weighting Method (FAWM) using Fuzzy Logic Theory, the finally proposed.

The fuzzy logic theory was applied for two purposes: first, for the implementation of model-based decision rules, with the use of fuzzy numbers and linguistic variables concept; second, as a proposal, for supervised classification of satellite images. Bands were selected according to Principal Component Analysis (PCA) technique. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to yield land cover of dense and flooded vegetation layer.

Obtained results revealed different sensitivity values of each of four environmental components along the shoreline. When comparing the four models developed, it is concluded that each one proved to be better than the preceding, beginning from Simple hierarchyzation to FAWM. Application of FAWM generated four final sensitivity maps (a, b, c, d) of land covers, or scenarios. Resulted cover (d) is selected for its highest values, whose sensitivities values are organized as following: (1st) Mangrove ecosystem, within 40 m from shoreline, is the most sensitive one, with a value of 1.8, followed by (2nd) Estuarine ecosystem along the shoreline, with a value of 1.5, (3rd) Mangrove far from shoreline, with a value of 1.32, (4th) Urban coastal along shoreline 1.2, (5th), Estuarine far from shoreline (1.02), (6th) Sandy beach along shoreline 1.0, (7th) Urban coastal far from shoreline 0.72, and (8th) Sandy beach far from shoreline 0.52.

Comparing model's results, the best one resulted to be FAWM, complemented with MCE techniques, which proved to be the most robust and accurate, for its theoretical basis and easy-to-use, its application under GIS, and its flexibility in application under the concept of fuzzy logic, applied to decision rules, which permitted construction of scenarios, and in this way, improve the decision-making process and the design of protective and mitigating measures against the risk of oil spills.

**Key words:** Environmental Sensitivity Analysis, oil spills, Multicriteria Evaluation (MCE) techniques, fuzzy numbers, GIS, Satellite images, Maracaibo Lake, Venezuela.

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICACIÓN

- A la Universidad de los Andes, mi Alma Mater, fuente de mi formación profesional y de mi quinto egreso exitoso de sus instalaciones.
- Al Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas, de la Facultad de Ingeniería, especialmente al Dr. Julio Flórez, al Dr. Edgard Chacón y a la Sra. Milagros, por su excelente atención y trato.
- A mi profesor tutor, Dr. Hervé Jegat, por su efectivo asesoramiento en el desarrollo de éste trabajo de investigación.
- Al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), por su respaldo para la realización de estos estudios de cuarto nivel mediante una Beca parcial de Estudios, especialmente la Lic. Lolimar Vargas.
- A la Agenda de Investigación Ambiental para la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM, FONACYT, PDVSA, Fundacite-Zulia, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes), especialmente a la Ing<sup>a</sup> Niovy García, a la Ing<sup>a</sup> Carmen Goitia y al Geógrafo Fredy Flores, por la facilitación de las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo.
- Al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la ULA, por el financiamiento aportado para la culminación de esta tesis.
- Al Programa Andes Tropicales, Biol. Yves Lesenfants, por el préstamo de imágenes satelitales adicionales.
- A mi familia, esposa e hijos, Aurora, Victoria Gabriela y Julián Andrés, a mi madre Ma. Asunción, a mis hermanos, Petronita y Nelson, por el apoyo que me brindaron durante todo este tiempo, mi éxito es de ustedes.

**1RA PARTE**

**INTRODUCCIÓN. CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO.**

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**- 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. El diccionario se refiere a Gestión como la realización de diligencias para cumplir un deseo u objetivo (McGraw-Hill Eds. 2001), en el caso del medio ambiente el objetivo consiste en que la sociedad disponga de una elevada calidad ambiental, esto tiene consecuencias notables en el estilo de desarrollo y en las actividades que lo soportan. A nivel de éstas últimas, dicho objetivo significa integración con su entorno la gestión ambiental afectará, por tanto, a los dos elementos implicados en los problemas ambientales: al elemento activo, es decir, las actividades que están en la causa y que son el vehículo del desarrollo, al pasivo, los factores ambientales que reciben los efectos, y las relaciones e influjos mutuos (Gómez Orea, 1.999).

Según Gómez Orea (1.999) la gestión ambiental debe entenderse como la conducción del sistema ambiental a través del comportamiento de los agentes implicados en ellos. Los agentes pueden encuadrarse en tres grandes grupos: los productores (empresas fundamentalmente), los consumidores o población en general, y las autoridades. A todos ellos afecta la gestión ambiental para mejorar su comportamiento; de hecho, la sociedad se ha dotado de instrumentos que implican, aunque de distinta forma, a todos ellos. El objetivo general señalado sugiere una inmediata participación en cinco objetivos más concretos o líneas de acción, que se complementan y refuerzan de forma sinérgica: Prevenir degradaciones ambientales; Corregir actividades que generen o puedan generar degradaciones; Curar degradaciones: recuperar, restaurar, reformar, rehabilitar espacios y factores ambientales degradados; Potenciar la fortaleza del medio ambiente y de los factores que lo forman; y, Poner en valor recursos ambientales ociosos.

De forma general, el Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA) se puede asociar a los primeros cuatro objetivos. 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, 1.990).

Debido a su carácter geográfico, es decir, maneja variables ambientales con ubicación geográfica propia o coordenadas geográficas, el 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.

Otro autor, Birkin et al. (1.987), en Barredo (1996), afirma que el Modelado Espacial es concebido como la unión o matrimonio entre métodos basados en modelos y las operaciones de los SIG para proporcionar herramientas adecuadas para asistir a la planificación; es decir, se usan las operaciones básicas del SIG para resolver problemas espaciales. Barredo (1.996) 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.

El principal uso de los modelos es como una herramienta para añadir valor a la información, es decir, generar nuevos datos, por medio de un proceso establecido, a partir de los datos existentes en la base de datos y modelos que describan en cierta forma el proceder del mundo real en determinadas condiciones, obteniendo así resultados o soluciones acerca de problemas espaciales complejos. El mismo autor agrupa el uso de los modelos en conjuntos de procesos con diferentes características, a saber, como estructura para la transformación de datos, síntesis e integración de datos, actualización de información, análisis de impacto, pronóstico y optimización.

Debido a la gran complejidad del mundo real, al intentar modelarlo manejamos gran cantidad de información, se hace necesario entonces la utilización de herramientas informáticas para desarrollar tal actividad, como los SIG. En referencia a los SIG, ESRI (1.990) los define como “una colección organizada de hardware y software, datos geográficos y personal con el fin de capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y desplegar eficientemente todo tipo de información geográficamente referenciada”. NCGIA (1.990) citado por Bosque (1992), define los SIG como “un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”.

A su vez, FAO (1.996), señala que “los SIG son la mejor herramienta para combinación de información espacial, análisis, actualización y producción de nuevos mapas e información de una manera efectiva y económica; además, señala que los SIG proveen capacidad para almacenar información espacialmente referenciada (mapas), almacenar y asociar a la información espacial información descriptiva (tipos de suelos, tipos de coberturas, profundidad de suelos, propietarios, etc.), y análisis de la información espacial (como calcular el porcentaje de área de una cuenca con un determinado rango de pendiente)”.

Igualmente, Sheng (1.993) señala que los SIG permiten esencialmente, lo siguiente: realizar un gran número de manipulaciones, resaltando las

superposiciones de mapas, transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos; consultar rápidamente las bases de datos, tanto espacial como descriptiva, almacenadas en memoria; realizar ensayos analíticos rápidos y repetir los modelos conceptuales en despliegue espacial; comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal); efectuar ciertos análisis, rápidamente, que serían largos y tediosos de forma manual; e integrar, en el futuro, otra información que sea relevante y esté relacionada a las bases de datos originales.

Todo lo anterior es intrínseco de un proceso de toma de decisiones, es decir, para tomar decisiones acertadas se debe contar con información en cantidad y calidad suficiente, además de contar con técnicas que permitan el manejo adecuado y eficiente de tal información. En ese sentido se propone la utilización de técnicas que potencien el proceso.

Existen algunas técnicas que permiten mejorar el proceso de toma de decisiones, por lo tanto, ya que el ASA entra en esta categoría, podemos afirmar que la utilización de las mismas nos ayuda a lograr ese objetivo. 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. El mayor potencial de los SIG, para facilitar el trabajo de los administradores de recursos, es la posibilidad de manipular la información ambiental en forma de modelos predictivos y de toma de decisiones, que le permiten al ente decisor sustentar más sólidamente sus argumentos para proponer determinado curso de acción, como por ejemplo, poder valorar cuantitativamente la mejor ubicación de determinada actividad que afecte el medio ambiente. Además, si tenemos en cuenta que "desde finales de los años 80 los sistemas computacionales, Hardware y Software, que pueden ser usados para asistir la planificación y manejo de las cuencas se han hecho más disponibles, más potentes, menos caros y más fáciles de manipular" (FAO. 1.996), no se puede perder la oportunidad que se presenta para mejorar nuestras tomas de decisiones como administradores de recursos.

La EMC está en el ámbito de la Teoría de la Decisión, la cual puede orientarse en dos direcciones: la positiva (descriptiva) y la normativa (prescriptiva). La primera “conciene al campo de la lógica, la sicología y la sociología, basando su enfoque en “la elaboración de una serie de constructos teóricos y articulaciones lógicas que pretenden explicar y predecir el comportamiento de los agentes decisores reales” (Romero, 1.993, en Barredo, 1.996), en otras palabras, “se centra en especificar las razones por las cuáles las decisiones son tomadas de un modo determinado” (Eastman et al, 1993, en Barredo, 1996).

La segunda, la normativa, “comienza por definir la racionalidad de los agentes económicos en base a una serie de supuestos justificables intuitivamente, seguidamente se realizan una serie de operaciones lógicas para deducir el comportamiento óptimo de los agentes decisores como aquel que es compatible con la racionalidad previamente establecida (Romero, 1993, en Barredo, 1996)”. Es notable el contraste existente entre los dos enfoques planteados, mientras el primero intenta dilucidar el cómo son, el normativo plantea el establecimiento de cómo deben ser (cómo deben comportarse) los centros decisores, Barredo (1996). Con respecto al uso de EMC en la toma de decisiones sobre aspectos ambientales se pueden revisar las siguientes referencias: Carver (1.991), Pereira y Duckstain (1.993), Jankowski (1.995), Eastman et al (1.995), Martínez et al (2.000) y Gutiérrez (2.001).

Incluso, el proceso de tomar decisiones implica una carga de subjetividad que debe ser reconocida, lo que obliga, en la medida de nuestras posibilidades, a sustentar cuantitativamente el tomar tal o cual decisión. Además, los modelos de decisión no pueden ser estrictamente rígidos, deben reflejar la variabilidad de opiniones, criterios, o situaciones. El proceso de valorar o ponderar factores, componentes o variables debe contar con técnicas que sean lo más objetivas posibles, o en su defecto equilibrar las posiciones de los diferentes actores que participan en el mismo, así como permitir la creación, en la medida de lo posible, diferentes escenarios y así ofrecerle al decisor opciones.

Todo lo anterior se puede identificar como clave para el desarrollo de un ASA. Otro aspecto, de singular importancia, se refiere a las imprecisiones en que se incurre al manejar la información ambiental a través de tales medios informáticos. En relación a esto, se puede afirmar que al procesar la información ambiental con medios informáticos, como lo son los SIG, los Sistemas de Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales, la Cartografía Digital, los Sistemas de Posicionamiento Global y otros, se incurre en una serie de errores, que son introducidos en los procesos y métodos, e inclusive por los sistemas usados, errores que sufren un proceso de propagación que más tarde influirá en los productos finales buscados.

Por ejemplo, cuando se captura data de uso y cobertura de la tierra mediante un satélite, el mismo aparato sufre de defectos en ese proceso de captura, los cuales deben ser corregidos, esa información debe ser transformada a un sistema de coordenadas que permite ubicarla georeferencialmente, esto implica pasarla de la forma esférica (el geoide) a plana (el mapa), lo que también implica una carga de error. También, al automatizar o digitalizar información a partir de un mapa topográfico, el cual de por sí trae una carga de error, se incurre en errores asociados, entre otros, a la impericia del técnico digitalizador, o en los sistemas mismos (Fallas, 1995-96). Igualmente, O'Kelly (1994) en Fotheringham y Rogerson (1.994) plantea la necesidad de responder algunas preguntas al hacer análisis espacial con SIG, entre otras: cómo puede ser evaluada la calidad de la data manejada?, cómo puede ser usada tal data, inclusive sabiendo que se está ante algunas imprecisiones?.

Como se puede ver el proceso no está exento de tales errores o imprecisiones, incluso no se puede prescindir de ellos, pero como mínimo se debe tratar de identificarlos, cuantificarlos y en lo posible disminuirlos, y tomar decisiones estando al tanto de su existencia, para de esta manera conocer la calidad de la información a utilizar en la toma de decisiones y en la planificación del uso de los recursos naturales. En este trabajo se exploraron algunas técnicas, como la Lógica Difusa, que permiten analizar el fenómeno ambiental desde una perspectiva de límites difusos, imprecisos, los cuales son muy comunes en los ecosistemas o coberturas de la superficie terrestre que, sin ser errores, pueden llevar a generar información de

calidad dudosa. Tratándolos como características intrínsecas de tales ambientes y no como información cargada de error, al contrario, representativa de sus componentes constituyentes.

**- Planteamiento del problema**

Se podrá observar más adelante que los modelos de ASA ya desarrollados y revisados en ésta investigación (entre los que destacan Jensen et al 1.990, 1.993 y 1.998), adolecen de cierta sustentación al momento de asignar las respectivas sensibilidades a los diferentes tipos de elementos o componentes del ambiente en estudio. En tales modelos no se explican los métodos utilizados para la asignación de categorías, o ponderación de los niveles de sensibilidad. Además, como se dice previamente, el proceso de toma de decisiones en el campo ambiental no puede ser rígido, ya que el ambiente, es un ente de características muy peculiares, esto es, de permanente cambio en el tiempo y el espacio.

Específicamente, en el campo del ASA, se puede añadir a lo anterior que la determinación de la sensibilidad de determinada línea de costa debe ser hecha tomando en cuenta los intereses de los diferentes actores que la habitan, de seguro habrá grupos de intereses disímiles y con necesidades particulares como pescadores, hoteleros, alcaldes y comunidades urbanas, conservacionistas, etc., por lo tanto sería ideal la creación de modelos que incluyan la posibilidad de manejar diferentes opiniones y escenarios posibles que satisfagan de alguna forma tal variedad de intereses. Tomando en cuenta lo anterior, se deben proponer modelos más adaptados a esa realidad. Modelos descriptivos que representen la variedad de componentes puros y mezclados del entorno, así como modelos predictivos que permitan la creación de escenarios y que tengan en cuenta los diferentes grupo interesados. Este estudio pretende ser un aporte metodológico al logro de tales objetivos.

**- Importancia**

La Cuenca del Lago de Maracaibo ha sido, tradicionalmente, asociada a la producción petrolera del país, 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 de vital importancia 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.

Es importante destacar que en este estudio se utilizan imágenes satelitales ya que, si se tiene en cuenta el gran tamaño del área de estudio, podemos afirmar que la utilización de estos productos de los sensores remotos permite agilizar el proceso de descripción y diagnóstico de las características físico-naturales de la misma. Además, el procesamiento digital de tales imágenes como el corte de subimágenes, su georeferenciación, mejoramiento de contraste, Análisis de Componentes Principales, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, digitalización en pantalla, entre otras técnicas, permiten extraer, procesar y superponer información de forma rápida y eficiente en un área de tal magnitud. El desarrollo de una metodología ASA para la cuenca, ante eventuales derrames petroleros, y la aplicación efectiva de la misma permitiría desarrollar los respectivos planes de contingencia, para disminuir los efectos de tal eventualidad.

En este trabajo se propone un procedimiento metodológico para la construcción de un Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental bajo Sistemas de Información Geográfica, ejemplificado para la línea de costa del Lago de Maracaibo, que incorpora las bondades de las técnicas y métodos utilizables de forma automatizada, como la Lógica Difusa (los números difusos) y Técnicas de Evaluación Multicriterio, y el Procesamiento digital de imágenes satelitales (mediante técnicas como el Análisis de Componentes Principales y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), con el objeto de diseñar mapas de sensibilidad ambiental del área, a fin de mejorar el proceso de toma de decisiones en el manejo y gestión de los recursos naturales. El modelo ASA desarrollado está basado en ecosistemas tipo presentes, características de la línea de costa, y elementos antrópicos que se encuentren en la misma.

Es de resaltar que algunos de los principios y características del ASA pueden ser adaptados a modelos de análisis de vulnerabilidad, evaluación de amenaza y riesgos naturales, y pueden ser utilizados para evaluar el medio físico y socio-económico ante posibles desastres naturales, intervenciones antrópicas o cambios en los factores que los afectan. Incluso, las técnicas propuestas, como la Evaluación Multicriterio y la Lógica Difusa se han adaptado recientemente a este tipo de estudios (Ercanoglu y Gokceoglu, 2002; Rashed y Weeks, 2003). Se considera que este tipo de trabajo puede tener un impacto importante en la aplicación de metodologías científicas al manejo de recursos naturales.

## CAPITULO I MARCO TEÓRICO

### **I.1.- Sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

#### **I.1.1.- Breve historia y evolución de los SIG**

Para obviar demasiadas citas se aclara que lo referente a los SIG, expuesto a continuación, es extraído de Barredo (1996). Los SIG, con unos de 40 años de historia, constituyen una tecnología relativamente reciente, especialmente si pensamos que las grandes empresas comerciales relacionadas a la distribución y el uso de paquetes de SIG aparecieron y se consolidaron en los años '80. Desde principios de los '90 hasta la actualidad el desarrollo de la tecnología se ha concentrado en la integración de técnicas y programas compatibles con los SIG, tales como las de Evaluación Multicriterio (EMC) para poder asistir a la toma de decisiones territoriales. En esta etapa se desarrollaron especialmente los análisis de decisión en los SIG.

#### **I.1.2.- SIG: Definición y Componentes**

Un SIG básicamente está compuesto de cuatro elementos fundamentales: a. "Hardware" (parte física del sistema), b. "Software" (programas de aplicación), c. Datos, y d. "Liveware" (usuarios).

- a. Hardware: la parte física donde se asienta el SIG. Incluye la plataforma del computador y el conjunto de periféricos, como ploteadores, lectores raster (scanners), unidades de almacenamiento y procesamiento de datos, etc.
- b. Software: realiza las operaciones y manipulación de los datos. Se trata de diversos tipos de paquetes de SIG que realizan diversos aspectos particulares en cuanto al modelado de datos espaciales, operaciones, manera de almacenar los datos, capacidad de procesamiento, etc.

- c. Datos: este es el elemento crucial pues no sólo sobre él se realizan todas las operaciones posibles en un SIG, sino también es el aspecto que requiere mayor esfuerzo para su implementación en un proyecto SIG. El proceso de obtener una base de datos operativa es un aspecto fundamental y sumamente costoso en el desarrollo de un SIG.
- d. Usuarios: personas encargadas del diseño, implementación y uso del SIG. Sobre ellas recae la responsabilidad de gestionar y desarrollar todas las posibilidades que ofrecen estos sistemas para producir resultados, soluciones, selecciones, análisis, etc, a partir de las clases de datos espaciales.

### **I.1.3.- Estructura de los SIG y capas temáticas**

Por la estructuración de los datos espaciales en el SIG se puede entender cómo una representación abstracta y estratificada de la realidad, en donde cada estrato o capa es un tema específico (hidrografía, suelos, geología, etc.), y es representada por ciertos objetos espaciales (puntos, líneas, áreas o celdas). Cada uno de los estratos de información representa una variable temática y recibe el nombre de capa temática ("Layer"). El conjunto de capas temáticas de una región determinada puede concebirse como un conjunto de mapas superpuestos que se encuentran lógicamente relacionados (Barredo, 1.996).

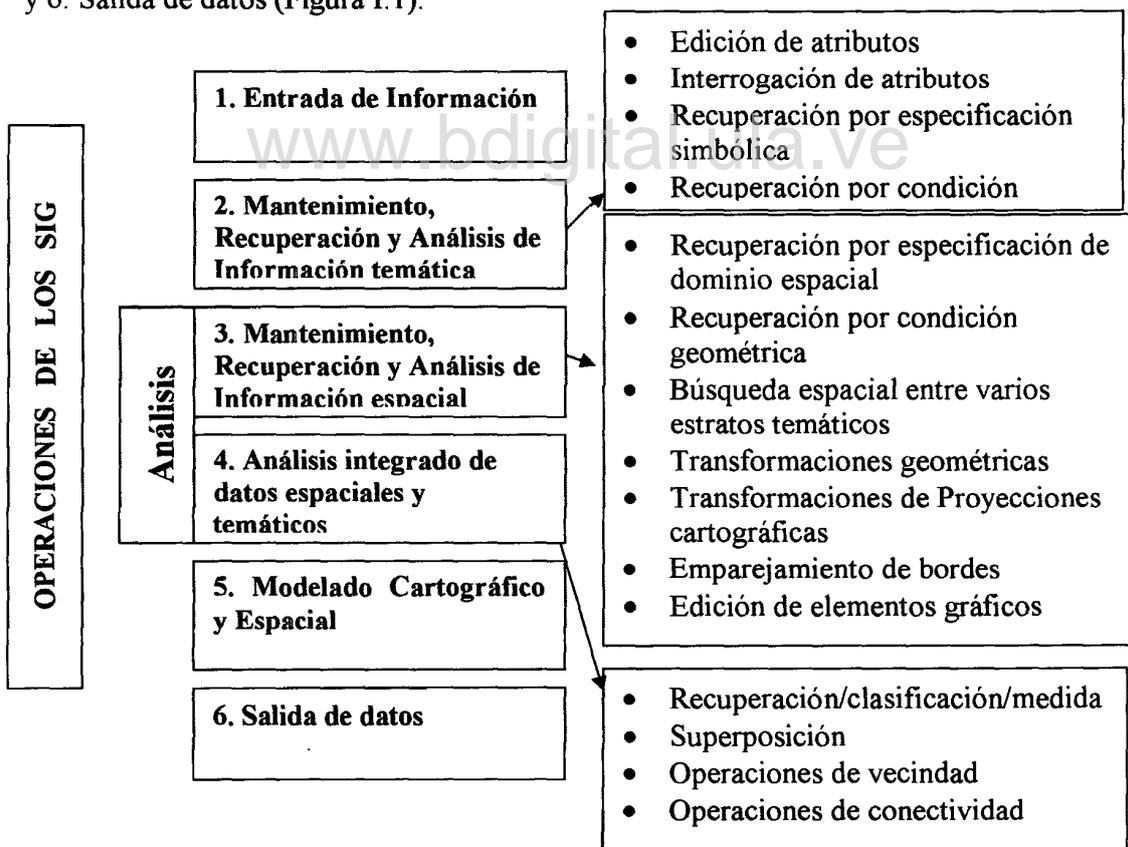
La estructuración del mundo real en capas involucra cierta dificultad para la representación de los datos espaciales como objetos espaciales pertenecientes a una capa, debido a que cada objeto espacial está definido por información sobre su posición (localización por coordenadas X, Y), relaciones topológicas (posición relativa en función de otros objetos espaciales), y atributos propios de cada objeto (características temáticas).

En este aspecto un buen SIG debe ser capaz de manejar a la vez las características espaciales de los objetos geográficos (localización absoluta y topología) y los aspectos temáticos asociados (Bosque, 1.992). El conjunto de capas de información de un SIG pueden superponerse para realizar determinadas

operaciones espaciales debido a una característica fundamental: un punto de una determinada capa tiene exactamente la misma localización (X, Y) en las demás.

**I.1.4.- Funciones, Operaciones y análisis de datos en los SIG**

Las funciones de los SIG se pueden concretar a partir de las operaciones que se puedan desarrollar. Las operaciones que lleva a cabo un SIG, con los datos de las bases de datos, se pueden realizar tanto sobre el componente temático como sobre el espacial o sobre ambos componentes simultáneamente. Barredo (1.996) distingue seis grupos genéricos de operaciones según el aspecto del dato que se analice o gestione: 1. Entrada de datos, 2. Sobre el aspecto temático, 3. Sobre el aspecto espacial, 4. Sobre ambos componentes a la vez, 5. Modelado cartográfico y espacial, y 6. Salida de datos (Figura I.1).



**Figura I.1. Funciones y Operaciones de los SIG**

Entre las operaciones de análisis espacial se pueden citar: 1) Para capas de puntos: medidas de centralidad y dispersión de puntos en un área, análisis del vecino más próximo, análisis de autocorrelación espacial, y modelos de autoregresión espacial. 2) Para capas de líneas: descripción de líneas, medidas de cohesión de una red, determinación de distancias y recorridos de una red, medidas de accesibilidad topológica, y análisis de proximidad y accesibilidad. 3) Para capas de polígonos: descripción de líneas, análisis de contigüidad, análisis de autocorrelación espacial y comparación de capas.

En el caso de SIG raster se pueden realizar casi todas las operaciones mencionadas, exceptuando las operaciones de análisis de redes. En los SIG el rango de operaciones de análisis de datos espaciales es mucho mayor que las operaciones que se pueden realizar sobre los atributos temáticos. El cuarto grupo es el más destacado conjunto de operaciones de los SIG, se trata de las operaciones que se realizan sobre los componentes espaciales y temáticos a la vez. Es este conjunto de operaciones que diferencia a los SIG de los sistemas de cartografía automatizada o sistemas de diseño asistidos por computadora.

El quinto grupo de operaciones o de Modelado Cartográfico incluye un conjunto amplio de operaciones en una secuencia lógica donde se integran varias capas de información, operaciones topológicas y temáticas, información externa y **juicios de valor** con la finalidad de buscar soluciones a problemas de carácter espacial. Tomlin (1991), citado por Barredo (1.996), define el Modelado Cartográfico como el uso de operaciones básicas de un SIG en una secuencia lógica para resolver problemas espaciales complejos.

### **I.1.5.- Aplicaciones de los SIG**

Aunque los SIG tienen en la actualidad una gran variedad de aplicaciones, han servido tradicionalmente para facilitar la ordenación del territorio. En la actualidad existen dos fuertes tendencias en las aplicaciones de los SIG: procesamientos de tipos descriptivos como los inventarios de información; y

procesamientos de tipo prescriptivo que involucran el análisis y modelaje con la finalidad de ayudar a la toma de decisiones. Dentro del tema del manejo de los recursos ambientales se pueden reconocer cuatro principales aplicaciones genéricas:

- Inventario: Una de las primeras aplicaciones de los SIG fue la de almacenar datos y permitir la recuperación selectiva de registros mediante consultas sencillas.
- Análisis de Cambios: Este tipo de aplicación está unido especialmente a las técnicas de los sensores remotos y del procesamiento de imágenes orbitales que facilitan el monitoreo de los cambios en los sistemas de recursos naturales. Entre los temas más estudiados sobre dinámica de cambios mediante el uso de SIG se encuentran: la dinámica del uso de la tierra, cambios de uso y cobertura de la Tierra (Gutiérrez, 1999), inundaciones y contaminación (ej. Derrames petroleros).
- Manejo y distribución de recursos ambientales: Este género de aplicaciones incluye la ubicación de sitios de mayor aptitud, sitios para la producción, recreación, pesca, acuicultura, así como la exploración de recursos, pesqueros, mineros o petroleros mediante el uso de SIG y sensores remotos.
- Prevención y Manejo de desastres: ésta es una aplicación relativamente reciente, en la que se incluyen los mapas de riesgos potenciales a diferentes tipos de desastres, las zonificaciones de costos de reconstrucción, las valoraciones socioeconómicas de los efectos de tormentas extremas y de inundaciones, así como valoraciones de vulnerabilidad debido a efectos de levantamiento del nivel del mar, y zonificación de diferentes sensibilidades de los ecosistemas ante riesgos tecnológicos, entre otras.

## **1.2.- El Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA)**

En la medida que el hombre interviene el medio ambiente, con fines de asegurarse alimentación, medios de subsistencia, vivienda y comodidades, a través de proyectos o actividades, incurre inevitablemente en afectaciones que a la larga modifican el hábitat natural ocupado por éste. En todos los casos tales intervenciones tienen efectos de diferentes niveles, positivos o negativos, por supuesto que las preocupaciones fundamentales vienen dadas en el énfasis de aumentar los positivos y disminuir los negativos, aunque esto se desvirtúa cuando la preocupación se acentúa

al pensar en los costos económicos de aplicar medidas de prevención, corrección de efectos negativos y mejora del medio ambiente. Situación que presiona a los responsables del proyecto a obviar o disminuir esos gastos, con los consecuentes resultados del deterioro de la naturaleza y aumento del pasivo ambiental.

Los diferentes ecosistemas que soportan la presencia del hombre se caracterizan por poseer diferentes capacidades de absorción o soporte ante las actividades o acciones interventoras, tienen diferentes extensiones, componentes y elementos, procesos de recuperación y asimilación, lo que permite caracterizarlos en función de sus diferentes niveles de vulnerabilidad o sensibilidad ante tales acciones.

Se han desarrollado e implementado diferentes métodos y técnicas para conocer y evaluar los efectos que tienen las diferentes actividades del hombre sobre el medio ambiente, uno de esos es la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), que busca conocer los efectos de un determinado proyecto, antes de ejecutarlo, en un determinado sector seleccionado para acogerlo, por supuesto que para saber esos efectos debemos conocer previamente la susceptibilidad y vulnerabilidad de tal espacio ante tales actividades. La EIA puede desarrollarse individualmente o enmarcada dentro de un proceso de Ordenación Territorial. En general, la EIA consta, como mínimo, de cinco componentes, nombrados a continuación: Descripción del Proyecto, Descripción del Medio (Diagnóstico), Identificación de los impactos, Identificación de las Medidas correctivas, y Programa de Monitoreo.

En la descripción del medio se incluye al diagnóstico. El diagnóstico del medio físico, en la Ordenación Territorial, contiene aspectos descriptivos e interpretativos con los siguientes objetivos (Gómez Orea, 2002):

- Conocimiento de las características naturales del territorio: estructurales y funcionales, basado en un inventario de las mismas y una interpretación de su funcionamiento
- Comprensión de las formas en que se utiliza el territorio y sus recursos naturales, incluyendo las degradaciones y amenazas que actúan sobre él.
- Valoración del territorio, en términos de méritos de conservación, basados en la excelencia, significado y función de los elementos y procesos que se dan en él

- Estimación de la potencialidad del territorio, en términos de las oportunidades que ofrece, en cuanto recurso, soporte y receptor de desechos, para las actividades humanas
- Estimación de la **fragilidad o vulnerabilidad** del territorio ante dichas actividades
- Conocimiento de los riesgos naturales que se dan en el territorio y sus implicaciones para las actividades humanas
- Determinación de la capacidad de acogida del territorio para las citadas actividades

La estimación de la fragilidad o vulnerabilidad se asocia al Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA), y es parte importante tanto en las EIA (metodología específica) como en la Ordenación Territorial (marco mayor), ya que nos permite conocer la sensibilidad del medio ante proyectos de inversión o actividades en desarrollo. Específicamente, como se dijo al principio de éste documento, el ASA permite conocer la sensibilidad de los ecosistemas de determinada área geográfica ante derrames de hidrocarburos, proyectos ya instalados como oleoductos o, a lo largo de rutas marítimas de transporte de combustible. Otra forma de conocer la sensibilidad de un determinado ecosistema es a través del concepto de Carga Crítica (Gómez Orea, 1.999). La carga crítica es un concepto que se aplica a la contaminación y se refiere al umbral de concentración de un contaminante, aislado o asociado a otros, por debajo del cual no causa efectos significativos sobre la estructura y función de los ecosistemas. Para determinarlo se recurre a las curvas de respuesta de un ecosistema o de alguno de sus elementos más sensibles a los diversos tipos de contaminantes; la carga crítica vendría definida por el punto de la curva a partir del cual un nuevo aporte supondría la aparición de daños reconocibles.

El concepto es extensible a los efectos de cualquier otra actividad, estableciendo la respuesta del medio a diferentes niveles de actuación e intensidad, con las siguientes ventajas:

- permite dividir el espacio en zonas con diferentes **grados de sensibilidad** frente a los contaminantes potenciales y orientar la localización hacia las zonas de mayor capacidad de amortiguación.

- el conocimiento de dicha sensibilidad permite considerar los efectos acumulados de una serie de actuaciones, cada una de ellas tolerable de forma aislada, pero cuyo conjunto puede superar la resistencia o capacidad de respuesta del medio.

El ASA permite evaluar cuán susceptible puede ser el área, ecosistema o medio a manifestar cambios en su condición actual ante cualquier intervención del hombre. Estableciendo gradaciones espaciales y temporales de la susceptibilidad del ambiente frente a posibles intervenciones, de tal forma que cada variable caracterizada sea expresada en función de su mayor o menor capacidad de mantener un equilibrio en sus condiciones o funcionamiento.

Los objetivos del Análisis de Sensibilidad Ambiental son (Sandia y Roa, 1.990): 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. 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.

La valoración de los grados de sensibilidad ambiental de un área se pueden establecer a través de dos criterios básicos (Sandia y Roa, 1.990), estos son:

- la evaluación de la capacidad de respuesta que poseen los distintos componentes ambientales para aceptar la incidencia de las actividades humanas sin sufrir transformaciones o cambios. Tal es el caso de las zonas de fuerte pendiente, en las cuales los procesos de erosión o de pérdida de suelos pueden acelerarse a través de las actuaciones humanas.
- de acuerdo a los niveles de susceptibilidad que pueden tener los componentes ambientales al desarrollo de procesos de desestabilización natural en los que no intervienen acciones antrópicas de manera directa. Por ejemplo, la sismicidad de un área tiene que ver con las características propias de la estructura geológica de la región y en la cual la actuación humana está ausente.

La calificación de la sensibilidad ambiental de cada componente sobre unidades territoriales de análisis genera áreas homogéneas de sensibilidad que tienen una expresión espacial, representada cartográficamente a través de los Mapas de Sensibilidad Ambiental (MSA). El análisis mediante la metodología de sensibilidad ambiental se orienta al establecimiento de una zonificación ambiental del área, en la cual puedan determinarse áreas de protección de los recursos naturales potencialmente más frágiles y áreas de desarrollo, donde las condiciones naturales ofrezcan menores restricciones y mayores niveles de soporte a los procesos de intervención antrópica, y que sirva de referencia y apoyo a los organismos encargados de la permisología.

Según (Sandia y Roa, 1.990) el Análisis de Sensibilidad Ambiental constituye una fase de la EIA que permite establecer el vínculo entre las características del medio y los posibles efectos del proyecto o determinada actividad sobre dicho medio. Estableciendo gradaciones espaciales y temporales de la susceptibilidad del ambiente frente a posibles intervenciones, de tal forma que cada variable caracterizada sea expresada en función de su mayor o menor capacidad de mantener un equilibrio en sus condiciones o funcionamiento.

### **I.2.1.- Metodologías de Análisis de Sensibilidad Ambiental**

Una vez que se conoce el marco en que puede estar incluido el ASA, se exploran a continuación diferentes formas de evaluar la sensibilidad de los componentes ambientales, sean físico-naturales o socio-económicos. Se exponen algunas metodologías utilizadas para la determinación de la sensibilidad del medio ante la presencia de proyectos o actividades humanas.

De acuerdo a CEOTMA (1.984) dos términos que pueden equipararse de alguna forma al de sensibilidad, y que están definidos de la siguiente manera: la Fragilidad y la Vulnerabilidad. Las mismas se entienden como el grado de susceptibilidad al deterioro ante la incidencia de determinadas actuaciones. Pueden definirse también como el inverso de la capacidad de absorción de posibles

alteraciones sin pérdida de calidad. Aunque estas definiciones, y en especial la primera, llevan implícita la idea de relación con posibles actuaciones o alteraciones, los rasgos del medio físico tienen un significado genérico de fragilidad o vulnerabilidad, que se corresponde con el impacto, como la calidad con la capacidad.

En esta misma línea puede considerarse la idea de Riesgo, también genéricamente ante cualquier actividad. Es decir, puede hablarse de fragilidad de la vegetación, de vulnerabilidad de la fauna, de riesgo de incendio o de erosionabilidad, sin hacer referencia a ninguna actividad. De todas formas, es claro que un territorio presenta, de hecho, diferente vulnerabilidad según sea una u otra actividad la que incida sobre él; ésta diferencia queda recogida en la valoración del impacto, cuya magnitud será función de la actividad que lo produce y de la fragilidad y calidad del medio que lo recibe.

Con respecto a la reversibilidad, o el grado de dificultad que una entidad degradada tiene para volver naturalmente a su estado anterior al impacto, y su relación con la sensibilidad, en CEOTMA (1.984) se cita a Godron y Poissonet (1.973); estos autores utilizan también el término “rapidez de cicatrización”, que indica las diferentes aptitudes del medio para producir en un tiempo dado cierto volumen de vegetación, esta noción conecta con la de reversibilidad en lo que se refiere al tiempo que tardará la vegetación en recuperar su estado primitivo, en el caso que haya sido degradado por alguna actividad humana. Los mismos autores han realizado estudios comparando “la sensibilidad” de las diversas especies dominantes del paisaje, considerando cinco tipos de cicatrización:

- I Bastante lenta,
- II Lenta, - III Media,
- IV Rápida, y
- V Bastante rápida

Las velocidades de cicatrización, clasificadas de I a V, corresponden, de hecho, a una escala de cinco grados de actividad biológica creciente. La determinación de la velocidad de cicatrización es fácil, en la medida en que se

disponga de un inventario que permita subrayar la posición relativa de las diversas especies vegetales respecto a los estados de las variables ecológicas más importantes. Se puede deducir que los anteriores autores solo toman en cuenta factores biológicos, a nivel de recuperación de especies ante una actividad dada.

#### **I.2.1.1.- Índice ambiental del medio: Sensibilidad y Diversidad Ecológica (Canter, 1997)**

Cooper y Zedler (1.980), en Canter (1.997), describen un método de índice (básicamente un sistema de clasificación) para valorar la sensibilidad relativa de los ecosistemas de una región ante posibles alteraciones. Según estos autores, la sensibilidad ecológica a alteraciones de cada área o ecosistema de una región es evaluada en términos de:

- 1) Importancia del ecosistema tanto regionalmente como globalmente;
- 2) Rareza o Abundancia del ecosistema relativa a otros en la región o en cualquier otra parte, y
- 3) la Recuperabilidad o Resiliencia del ecosistema

Siguiendo la aplicación y evaluación de estos componentes se prepara entonces un mapa de áreas ecológicamente sensibles que se describen en texto adicional. Este texto debe indicar aquellas características específicas que hacen que cada área sea ecológicamente importante y ambientalmente sensible y debe indicar qué clases de alteraciones ecológicas podrían preverse en los proyectos propuestos.

La **Importancia** de los ecosistemas representa una valoración subjetiva de la importancia biológica de las especies y del ecosistema. Los anteriores autores enumeran las características consideradas en la determinación de la importancia:

- 1) Papel del ecosistema local en la función del ecosistema regional, o importancia de las especies en la función del ecosistema
- 2) Singularidad y aislamiento
- 3) Valor estético real y potencial
- 4) Valor científico real y potencial

- 5) Valor económico real y potencial
- 6) Tamaño relativo o rareza
- 7) Expectativas de persistencia continuada.

La **Rareza o Abundancia** es el elemento más fácil de medir en el modelo de sensibilidad, generalmente se conoce el área ocupada por cada ecosistema principal o el número de plantas y animales de interés, dentro de unos límites aceptables de error, o también, se puede estimar a partir de imágenes de satélite, de fotografías aéreas o trabajo de campo. Al igual que el resto de los componentes, los ecosistemas que cubren áreas más extensas ofrecen una mayor amplitud y flexibilidad para el diseño y ubicación del proyecto. Inversamente, un ecosistema que no fuera especialmente importante, puede adquirir una gran importancia simplemente porque su tamaño sea reducido y tenga por tanto una mayor probabilidad de ser destruido. La sensibilidad del ecosistema está inversamente relacionada con la superficie, pero ésta relación no es de carácter lineal.

La **Resiliencia o recuperabilidad** es una medida de la capacidad que tiene un ecosistema para absorber la tensión ambiental sin cambiar a una condición ecológica diferente apreciable. Implica la capacidad del sistema para reorganizarse por sí mismo cuando está bajo tensión, estableciendo itinerarios alternativos de flujos de energía que le permitan mantener su viabilidad después de la alteración, aunque pueda conseguirlo quizás gracias a una modificación de su estructura de especies.

El grado de resiliencia o recuperabilidad de un ecosistema o de las especies, medido como respuesta a una tensión ambiental determinada, es una composición de muchas reacciones parciales independientes, que son listadas a continuación: Mortalidad, Cambios de índices de nacimientos, Desplazamientos (emigración o inmigración), Cambio de cobertura, Crecimiento o vitalidad de individuos, Cambio en comportamiento, e Interrupción de interrelaciones del ecosistema (Ej: interacción depredador-presa).

Quizás, el indicador más importante de la resiliencia de las especies o de un ecosistema es el Índice de Natalidad o el Índice de restablecimiento. La importancia ecológica de un nivel dado de mortalidad, debido a una causa cualquiera, debe considerarse a la luz de la capacidad de las especies para repoblar un área abandonada.

En el planteamiento del Índice de Cooper y Zedler se definen cuatro niveles de sensibilidad ecológica. Estos cuatro niveles son unas útiles divisiones de un gradiente continuo:

- Áreas mínimamente sensibles: aquellas que ya han sido alteradas gravemente por el hombre, en las que no es probable que una interferencia humana adicional fuera capaz de inducir un cambio ecológico.
- Áreas de máxima sensibilidad: se limitaba a aquellas áreas donde las plantas o animales ecológicamente importantes serán muy reactivos incluso a una ligera intrusión humana, las consecuencias de este impacto no podrían reducirse con ninguna medida práctica a un nivel que fuera considerado como aceptable.

Los otros dos niveles de sensibilidad (principal y moderado) se encuentran entre los dos extremos anteriores. Se puede notar que los anteriores autores solamente toman en cuenta la sensibilidad de factores biológico-ecológicos.

#### **1.2.1.2.- Estudio de Factores y Componentes medioambientales (Conesa, 1997)**

En la misma tónica otro autor, Conesa (1.997), para conocer algunas características que determinan la importancia y significación de los factores y componentes medioambientales, expone algunas ideas y tendencias de cómo valorar los indicadores de cada componente. Entre estos incluye: atmósfera (ruido y vibraciones), agua, suelos (capacidad agrológica y capacidad agraria, erosión y contaminación), cubierta vegetal, fauna, paisaje, valores culturales, calidad de vida, demografía y nivel de empleo. Con fines de no extender demasiado éste documento se exponen solamente algunos componentes y aspectos de interés en este estudio:

## - Agua

La contaminación del agua se define como la alteración de su calidad natural por la acción del hombre, que hace que no sea, parcial o totalmente, adecuada para la aplicación o uso a que se destina. La calidad del agua no es un término absoluto; es algo que siempre está en relación con el uso o actividad a que se destina (calidad para beber, calidad para riego, etc.), por consiguiente, un agua que puede resultar contaminada para un cierto uso puede ser perfectamente aplicable a otro, de ahí que se fijen criterios de calidad del agua según los usos.

Se entiende por contaminantes del agua todos aquellos compuestos, normalmente emanados de la acción humana, que modifican su composición o estado disminuyendo su aptitud para alguna de sus posibles utilizaciones. Entre otros se consideran: sólidos en suspensión (suelos, minerales, subproductos industriales); elementos que modifican el color (agua caliente, colorantes); componentes inorgánicos (sal común, ácidos, sales metálicas); nutrientes (compuestos de nitrógeno, fósforo, potasio); residuos que demandan nitrógeno (materias orgánicas putrescibles por bacterias aerobias, que requieren oxígeno disuelto); compuestos orgánicos tóxicos (detergentes, plaguicidas, subproductos industriales); y contaminantes biológicos (bacterias y virus productores de enfermedades).

La manera más sencilla y práctica de estimar la calidad del agua consiste en la definición de índices o cocientes de las medidas de ciertos parámetros físicos, químicos o biológicos en la situación operacional, referenciados con otra situación que se considera admisible o deseable y que viene definida por ciertos estándares o criterios. Los parámetros mas frecuentemente admitidos y utilizados son: DBO; sólidos disueltos y en suspensión; compuestos de nitrógeno, fósforo, azufre y cloro; PH; dureza; turbidez; conductividad; elementos tóxicos; y elementos patógenos.

**- Cubierta vegetal**

Se entiende por vegetación al manto vegetal de un territorio dado. La importancia y significación de la vegetación, no se centra únicamente en el papel que desempeña éste componente como asimilador básico de la energía solar, constituyéndose así en productor primario de casi todos los ecosistemas, sino también en la existencia de importantes relaciones con el resto de los componentes bióticos y abióticos del medio; la vegetación es estabilizadora de pendientes, retarda la erosión, influye en la cantidad y calidad del agua, mantienen microclimas locales, filtra la atmósfera, atenúa el ruido, es hábitat de especies animales, etc.

Se entiende por alterantes de la cubierta vegetal, todas aquellas acciones físicas y biológicas, normalmente debidas a las actuaciones humanas, que directa o indirectamente degradan, transforman o destruyen la cubierta vegetal; entre otros se consideran: contaminantes atmosféricos, principalmente lluvias ácidas; fuego; contaminación de aguas; contaminación de suelos; microorganismos patógenos y parásitos; obras y actuaciones que destruyen la cubierta vegetal.

La valoración de la cubierta vegetal se efectúa mediante una metodología basada en el Interés y Densidad de las especies presentes. El Interés, se refiere a la calidad o rareza de las especies presentes (K), y la Densidad, al porcentaje de la superficie total considerada, cubierto por la proyección horizontal de la vegetación, bien en su conjunto, bien por cada uno de sus sustratos o especies.

Se toma como indicador del impacto, el **porcentaje de superficie cubierta (PSC)**, ponderado en función del índice de interés de las especies existentes:

$$P.S.C. = \frac{100}{S_t} \sum S_i \times K$$

Con los siguientes valores para K:

Siendo:

S t: la superficie total considerada

Especies	K
Endemismos	1
Raras	0,8
Poco común	0,6
Frecuente	0,4
Común	0,2
Muy común	0,1

S i: la superficie cubierta por cada especie o tipo de vegetación presente

De la expresión anterior se deduce que la unidad de medida será porcentual

#### - Erosión y contaminación del suelo

**Erosión.** Bajo el término erosión, se engloban todos los variados procesos de destrucción de rocas y arrastre del suelo, realizados por agentes naturales móviles e inmóviles, e igualmente por el hombre. De acuerdo con el agente erosivo se consideran: 1) Erosión hídrica: disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua, es el tipo más importante y de efectos más perjudiciales. Puede ser laminar, en surcos, canales; 2) Erosión eólica: proceso de barrido, abrasión y arrastre de las partículas del suelo por la acción del viento. 3) Otros tipos de erosión: marina, glaciár, biológica, etc. Entre los focos de erosión del suelo, se incluye: 1) minerías, que provocan una gran transformación paisajística, con grandes áreas de extracción, y grandes colinas con restos de explotación, se destruye el bosque y se facilita la erosión; y 2) pastos y zonas agrícolas en territorio inadecuado.

En relación a la contaminación del suelo, Seoáñez Calvo (1999) afirma lo siguiente. El suelo es un componente normal de la naturaleza, con constituyentes minerales y orgánicos, y con constituyentes biológicos formados por organismos que viven en él. La alteración física, química y biológica de las rocas provoca la formación de nuevos constituyentes minerales muy reactivos. Estos constituyentes, de pequeño tamaño y gran superficie, tiene cargas eléctricas casi siempre electronegativas (alguna vez son positivas), y son minerales arcillosos y óxidos de Fe, Al, Mn, Si, etc. Al tener gran superficie y esa carga eléctrica, pueden absorber e intercambiar cationes (a veces aniones). Por otra parte, el constituyente orgánico y biológico de la superficie del suelo sufre grandes transformaciones, que tienen como consecuencia la conexión con las propiedades antes indicadas de: superficie-carga eléctrica-intercambio iónico, por intermedio de otra característica importante que es la porosidad. Entre todas ellas confieren al suelo sus funciones ecológicas como componente del medio ambiente.

La ley de amortiguación de la naturaleza también se cumple en los suelos, es decir, los sistemas en equilibrio que están sometidos a impactos externos que tienden a deformarlos, sufren modificaciones resultantes, dirigidas a oponerse a la acción del impacto. Esto nos sugiere que el suelo es capaz de admitir alteraciones (contaminantes, por ejemplo) que pueden llegar a ser asimiladas si no son excesivas, lo que facilitará un mecanismo de eliminación de la contaminación.

#### **- Fauna**

Se entiende por Fauna, el conjunto de especies animales que viven en una zona determinada. Los estudios del medio físico han de enfocarse hacia la fauna silvestre, en la que, obviamente, no se incluyen los animales domésticos. Estos estudios han de partir del conocimiento taxonómico y de la distribución de especies, distinguiendo entre los ambientes terrestres, el de las aguas continentales y el de las aguas marinas. Hay que destacar que la fauna está fuertemente ligada a la cubierta vegetal, a la presencia de agua y otros factores del Medio. Una de las características propias de la fauna es la facilidad que tiene para adaptarse, dentro de ciertos límites, a circunstancias medioambientales cambiantes.

Como definiciones asociadas a la fauna, se consideran:

- Estabilidad: dentro de un área geográfica determinada, las poblaciones se multiplican sin traspasar el límite inferior que provocaría la extinción.
- Abundancia: se dice que una especie es abundante cuando existen muchos individuos de la misma, en el área de estudio, considerado en forma relativa, no en términos absolutos.
- Diversidad: abundancia de elementos distintos expresada en términos no absolutos para cada especie (sólo número de especies y abundancia relativa de las mismas. Este término está unido al concepto del área objeto del estudio).
- Rareza: una especie es rara cuando no es frecuente, visto desde un nivel taxonómico superior, dentro de un contexto territorial (nacional por ejemplo).
- Representatividad: carácter simbólico que tienen determinadas especies, incluye el carácter endémico.

- Singularidad: condición de distinto o distinguido. Es valor adicional que posee una especie por circunstancias extrabiológicas: estéticas, históricas, científicas, culturales.

Se toma como indicador del impacto, un índice VE, que informa el Valor Ecológico del biotopo a través de su calidad y abundancia.

### - Paisaje

El estudio del paisaje presenta dos enfoques principales. Uno considera el paisaje total, e identifica el paisaje con el conjunto del medio, contemplando a éste como indicador y síntesis de las interrelaciones entre los elementos inertes (rocas, agua, aire) y vivos (plantas, animales y hombre) del medio. Otro considera el paisaje visual, como expresión de los valores estéticos, plásticos y emocionales del medio natural. En este enfoque el paisaje interesa como expresión espacial y visual del medio.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Según Conesa (1997) para valorar el paisaje se tendrán en cuenta:

- La visibilidad: se refiere al territorio que puede apreciarse desde un punto o zona determinada (cuenca visual). El medio a estudiar será el entorno del proyecto y vendrá determinado por el territorio desde el que la actuación resulte visible, estando definido por la superposición de las cuencas visuales reales.

- La calidad paisajística: incluye tres elementos de percepción: 1) características intrínsecas del punto (morfología, vegetación, presencia de agua, etc), 2) calidad visual del entorno inmediato, 500-700 m, (litología, formaciones vegetales, grandes masas de agua, etc), 3) calidad del fondo escénico (intervisibilidad, altitud, formaciones vegetales y su diversidad, geomorfología, etc). La calidad puede estimarse de forma directa sobre la globalidad del paisaje (estimación subjetiva), influyendo en la misma alguna de sus características o componentes del paisaje (topografía, vegetación, agua, naturalidad, singularidad).

- La Fragilidad: capacidad del paisaje para absorber los cambios que se produzcan en él, está conceptualmente unida a los atributos anteriormente dichos.

- Frecuentación humana: la población afectada incide en la calidad del paisaje, por lo que se tendrán en cuenta núcleos urbanos, carreteras, puntos escénicos, zonas con población temporal, etc, dentro de la zona de visibilidad.

En éste caso se tienen los componentes que integran el área de estudio y que influyen en los diferentes niveles de sensibilidad: agua, cobertura vegetal (asociada a la fauna), suelo (playas), y el paisaje (asociado el componente socio-económico costa urbana).

En cuanto a métodos para desarrollar una ASA, de acuerdo a Benítez (1.998), existen los siguientes pasos metodológicos para un ASA:

- 1) Definición de variables del medio, fisico-biológico o socio-económico, que pueden ser afectadas;
- 2) Establecimiento de los sistemas de valoración (ponderación) de las variables consideradas;
- 3) Aplicación de los criterios de valoración para cada variable;
- 4) Elaboración del mapa de Sensibilidad Ambiental.

El mismo autor cita algunos criterios para la determinación de sensibilidad:

- 1.- Tipos de sensibilidad: medición cualitativa y cuantitativa
- 2.- Rango de valoración:
  - Criterios de valoración de indicadores socio-económicos
  - Criterios de valoración de indicadores fisico-naturales
  - Criterios de valoración para síntesis de sensibilidad de aspectos y variables
- 3.- Niveles de sensibilidad: Alta, Media, Baja
- 4.- Otras premisas para el análisis de sensibilidad del medio: Sensibilidad natural y los Riesgos naturales; la Sensibilidad natural y el proyecto; la Sensibilidad natural y el Ordenamiento Territorial
- 5.- Sensibilidad del medio biológico: vegetación terrestre, fauna terrestre, biota (comunidad planctónica, béntica, íctica).
- 6.- Premisas para el análisis de sensibilidad del medio socio-económico: independencia de las variables, análisis cuantitativo vs cualitativo, independencia del

proyecto, análisis de alternativas, referencia para la fijación de criterios, disponibilidad de la información., idoneidad de las variables de sensibilidad.

7.- Análisis de sensibilidad socio-económica: sensibilidad de la capacidad de soporte de centros poblados, sensibilidad de las instituciones locales, sensibilidad socio-cultural, sensibilidad de la infraestructura regional de apoyo, sensibilidad de los usos del suelo.

- A nivel municipal: capacidad de soporte de centros poblados, aspectos institucionales asociados al proyecto, aspectos socio-culturales
- A nivel del área directa de estudio: uso del suelo
- A nivel global del área de estudio: capacidad de soporte de infraestructura regional
- Resultados del ASA (medio físico): sensibilidad geológica y geomorfológica, sensibilidad hidrológica (aguas superficiales y aguas subterráneas), sensibilidad atmosférica.
- Síntesis de sensibilidad socio-económica: síntesis de sensibilidad por municipio, síntesis de sensibilidad de la infraestructura regional, síntesis de la sensibilidad del uso del suelo, síntesis socio-económica global.

Se puede notar que se debe tomar en cuenta tanto la sensibilidad del medio físico-natural como del medio socio-económico. De las metodologías revisadas se observa que no explican, para cada factor, cómo ponderarlos o valorarlos al incluirlos en un ASA, el entendimiento de éste aspecto es parte de la revisión teórica en este estudio. Más adelante se exponen algunas técnicas al respecto. Además, se puede concluir que para conocer la sensibilidad de los componentes ambientales se requiere del uso de indicadores e índices, se considera entonces importante hacer una breve descripción de cómo construirlos y sus características. Se hará entonces a continuación una descripción de los conceptos Indicadores e Índices, con el fin de entender cómo los especialistas o expertos desarrollan o generan información en cuanto a los diferentes niveles de sensibilidad de los componentes físico-naturales y socio-económicos mediante el uso de tales técnicas, y de esta forma se crean una impresión del medio estudiado para conocer su sensibilidad.

También podemos resaltar que evaluar la sensibilidad de los componentes de un determinado espacio geográfico, ante una posible intervención antrópica del mismo, es una tarea no exenta de complejidad, tal complejidad está relacionada a la composición misma de tal espacio, a medida que exista mayor número de componentes y que sus relaciones sean más intrincadas, en tal medida se incrementará la dificultad para valorar tal sensibilidad. Una de las tareas a alcanzar en ésta investigación es diseñar un índice que permita no solo tomar en cuenta la diversidad del objeto de estudio, sino también que el índice en si mismo sea de fácil elaboración.

### **1.2.1.3.- Indicadores e Índices**

En relación a ésta temática, Salazar (1.999), al exponer las diferencias entre Indicadores e Índices ambientales, afirma que desde hace unos años se está aplicando la utilización de ciertos factores o parámetros ambientales, los cuales tienen como característica presentar un rango de comportamientos en función de sus propiedades intrínsecas, ó en función de las presiones ejercidas por las actividades humanas. Estos parámetros ambientales son conocidos con el nombre de Indicadores Ambientales y sus análisis conjuntos se denominan Índices Ambientales. Tanto los indicadores como los índices se utilizan para evaluar:

- Diagnósticos ambientales y ecológicos;
- Estudios de Impacto Ambiental incluido el ASA;
- Planes de manejo ambiental; Seguimiento y monitoreo ambiental;
- Sistemas de gestión ambiental;
- Auditorías ambientales;
- Riesgo ecológico;
- Planes de ordenación ambiental.

#### **- Indicadores**

De acuerdo a Salazar (1.999), la palabra indicador viene del verbo latín *indicare*, que significa mostrar, anunciar, estimar o asignar un precio. Los

indicadores son parámetros (p.e., una medida o propiedad observada), o algunos valores derivados de los parámetros (p.e., modelos), que proporcionan información sobre el estado actual de los ecosistemas, así como patrones o tendencias (cambios) en el estado del medio ambiente, en las actividades humanas que afectan o están afectadas por el ambiente, o sobre las relaciones entre tales variables.

El medio ambiente está compuesto por cinco componentes ambientales: Suelo y subsuelo, Agua, Aire, Flora y Fauna, y Socioeconómico. Cada componente se divide a su vez en diferentes factores ambientales, por ejemplo: Litología, Procesos dinámicos, Calidad del agua, Calidad del aire, Nivel de vida. Las características o condiciones de tales factores son los indicadores ambientales, y es una expresión que puede ser medida de manera cuantitativa y otras de manera cualitativa. Un factor puede presentar un indicador o varios indicadores, por ejemplo: Condiciones geomecánicas, Grado de meteorización o erosión, Temperatura, Niveles de Nox, Salarios Básicos.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Estableciendo los Indicadores (Meteorización) para cada Factor (Litología) y para cada componente (Suelo y Subsuelo), las unidades de medida quedan automáticamente definidas y delimitadas en virtud de la definición del propio indicador. Son hechos de carácter cuantitativo y cualitativo que expresan de alguna forma la variable requerida, representando las características de calidad, fragilidad, e importancia de un elemento o componente ambiental. Son parámetros que señalan el estado actual de los elementos de un ecosistema, deben cumplir con una serie de estadísticas para su valoración y uso. Deben ser modelos empíricos de la realidad ambiental, cuyos valores y objetivos se pueden verificar. Constituyen variables en lo posible medibles que representen las características de calidad, fragilidad e importancia de un elemento o componente ambiental. Como se define aquí, los indicadores incluyen información geográfica, e información usada en manejo ambiental a cualquier escala.

### - Clasificación de indicadores por niveles

Salazar (1.999) afirma que uno de los principales problemas en la evaluación ambiental consiste en la selección de las variables ambientales y la síntesis e integración de las mismas para que puedan ayudar a cuantificar el impacto de una acción. Debido a las múltiples interrelaciones entre los elementos ambientales, se debe abordar el problema a partir de la utilización de indicadores individuales, que permitan detectar cambios en la calidad de un sistema y, que su agregación facilite su comparación e interacción para evaluar lo niveles de cambio en su conjunto.

No existen indicadores universales, puesto que las características ecosistémicas y antrópicas son diferentes dentro de una región o dentro de un país. De acuerdo a las características de los indicadores, se establece un **orden jerárquico**, el cual permite conocer las relaciones entre las categorías establecidas y así determinar la tipología del ecosistema, manifestándose por la interacción de indicadores a diferentes niveles, Salazar (1.999). Se tienen entonces:

- **Indicadores de Tercer Nivel:** son los indicadores macros: Abióticos, Bióticos y Socioeconómicos; son conocidos como sub-componentes del sistema ambiental.

- **Indicadores de Segundo Nivel:** son indicadores que definen patrones de importancia en el área estudiada y agrupan indicadores específicos de primer nivel, son conocidos como los diferentes medios de cada uno de los sub-componentes. Los indicadores de segundo nivel son: medio geológico, medio geomorfológico, medio climatológico, medio hidrológico, medio edáfico, vegetación, fauna, medio social, medio económico, medio cultural, medio demográfico, medio paisajístico.

- **Indicadores de Primer Nivel o Específicos:** son cuantificables y cualificables, se caracterizan porque determinan patrones espaciales y funcionales de los ecosistemas, definiendo unidades ecológicas y de paisaje. A estos indicadores se les debe hacer el análisis de influencia - dependencia, con el objeto de identificar cuáles son los más importantes y cuáles son los más vulnerables dentro del ecosistema. Aunque un

indicador ayude a definir las características de un ecosistema, no siempre significa que tenga un valor relevante en la evaluación ambiental. Se analizan los valores de Dependencia e Influencia por indicador.

Otra forma de clasificar los indicadores, no es por niveles, sino reflejando los usos que el hombre le ha dado al medio natural Salazar (1.999):

- 1) Fuente: medio como abastecedor de bienes y servicios;
- 2) Sumidero: medio como sitio o lugar de descarga de contaminantes; y
- 3) Soporte o acogida: medio como lugar donde se realizan las actividades mineras, agropecuarias e industriales.

Ejemplos de indicadores "Fuente": Reservas de Bosques, Reservas de Agua, Tasas de Extracción, Reservas mineras. Ejemplos de indicadores "Sumidero": Emisiones de contaminantes, Cantidades de residuos sólidos, Eutrofización, Carga de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno). Ejemplos de indicadores "Acogida": Capacidad de Renovación, Uso potencial del suelo, Biodiversidad.

Odum (1.969) sugiere el uso de algunas características ecosistémicas, que pueden servir para la construcción de indicadores:

- 1) En general, las especies y ecosistemas "Esteno" (Manglar), son mucho mejores indicadores que las especies "Euri" (Herbáceas).
- 2) Grandes especies (Peces) usualmente son mejores indicadores que pequeñas especies (plancton), debido a que una gran biomasa puede ser sostenida con un flujo de energía dada.
- 3) Antes de considerar ciertas especies como indicadores, debe haber abundante información de campo, así como evidencia experimental de que el factor analizado es realmente limitante, ya que las especies también tienen la habilidad de compensar o adaptarse a ciertos cambios ambientales.
- 4) Es mejor tener relaciones numéricas entre especies, poblaciones y comunidades enteras que especies únicas, ya que la integración de condiciones es reflejada por el total más que por una fracción.

Salazar (1999) cita los siguientes tipos de indicadores: Indicadores Geológicos y Geomorfológicos, Edafológicos, Hídricos, Bioindicadores, Bacteriológicos, Físico-químicos, Climáticos, Paisajísticos, Sociales. También, Fabbri y Patrono (1995) citan los siguientes indicadores ambientales que se utilizan en las geociencias (se ofrece un listado parcial): Patrones de uso y cobertura de la tierra, Degradación de la tierra, Área por tipos de bosque, Contaminación del agua, Tratamiento de aguas servidas, Emisión de contaminantes por industrias importantes, Densidad de la red vial, Cantidad de residuos sólidos generados, Porcentaje de áreas naturales protegidas, y Actividades con importante impacto ambiental.

#### - Índices Ambientales

De acuerdo a Salazar, (1999) los Índices son una agregación de estadísticas y/o indicadores, los cuales resumen a menudo una gran cantidad de información relacionada, usando algún procedimiento sistemático de ponderación, escala y agregado de variables múltiples en un único resumen. Un índice ambiental es una categorización numérica o descriptiva de una gran cantidad de información ambiental, con el propósito de simplificar tales datos, y hacer más fácil la labor de decisión ambiental. Un índice ambiental es el producto de una manipulación matemática de un grupo de valores de indicadores definidos con relación a un estándar o valor deseable. Los Índices proporcionan una imagen sinóptica del medio o del grado de sustentabilidad.

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.

Es claro que un índice ambiental no es lo mismo que un indicador ambiental, ya que los indicadores se refieren a simples medidas de factores ambientales o especies, indicativos del sistema biofísico y socioeconómico. Mientras algunos índices son muy complejos desde una perspectiva matemática, se pueden analizar índices a través de simples comparaciones de datos.

### - Tipos de Índices

Salazar (1999) cita los siguientes: Índices físico-químicos (medio de la calidad del aire, medio de la calidad del agua), Índices bióticos, Índices edafológicos, etc. Entre las características exigidas para los índices están: **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.** El producto final de esta investigación será un índice de sensibilidad, en forma de mapa, se busca que tal producto cumpla con los anteriores requisitos, por lo tanto, se exploró la forma de adaptar las técnicas revisadas al objeto de estudio y de esta manera lograr el anterior objetivo.

En relación a la ponderación, más adelante se hace una revisión de las diferentes técnicas para ordenar, categorizar o ponderar los diferentes factores o tipos de elementos presentes en un área de estudio. Se debe aclarar que la valoración puede ser hecha tomando en cuenta indicadores e índices existentes o de fácil elaboración, aunque también se puede hacer uso de la opinión de expertos conocedores de los factores o componentes del medio a analizar. En este estudio, si se toma en cuenta el tamaño del área cubierta y por lo tanto el detalle que se puede alcanzar, se entiende que se debe utilizar un método que permita, de forma rápida y eficiente, evaluar la sensibilidad general de la línea de costa, aprovechando el conocimiento acumulado por tales expertos. Por lo tanto, se propone utilizar métodos de ponderación de fácil utilización, aunque sin perder la objetividad, fundamentación teórica, cuantificación deseada, y aprovechando la experiencia de tales expertos.

### **1.2.2.- Antecedentes de ASA**

De la revisión bibliohemerográfica desarrollada se pudo constatar que existen pocas referencias sobre la temática, es decir, no muchos investigadores han trabajado con las metodologías de ASA, menos todavía aplicando Sistemas de Información Geográfica, y más escasos son los trabajos en relación a derrames petroleros costeros. A continuación se expondrán los trabajos conseguidos y relacionados con el ASA.

Revisando aplicaciones de ASA en otras temáticas, se encontraron las siguientes. A nivel nacional y trabajando en otro tipo de proyectos, Sandia y Roa (1.990) al desarrollar la Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto de la Carretera Mérida-Panamericana, Venezuela, determinaron la sensibilidad ambiental del área en función de los siguientes factores: sensibilidad geológica, unidades geomorfológicas (posición), del relieve (pendiente), del uso potencial y del actual, de la vegetación, de la población, de los servicios e infraestructura.

También, Jáuregui (2.003) desarrolla un estudio de caso para el Análisis de Sensibilidad Ambiental del espacio geográfico a ser afectado por la ZOLCCYT (Zona Libre, Cultural, Científica y Tecnológica del Estado Mérida, Venezuela). Para esto, utiliza un Sistema de Información Geográfica, y plantea que el método tiene como objetivo establecer un marco de referencia a gran escala acerca de las condiciones ambientales y de los niveles de sensibilidad de aquellos componentes del medio, cuyas características o funciones lo hacen vulnerable ante las acciones de un proyecto en particular. Expone la necesidad de conocer las variables relevantes que tienen los componentes físico-naturales y socio-económicos para determinar la sensibilidad ambiental. Las consideraciones de las variables se fundamentan en la consulta a expertos en materia ambiental para la definición decisiva de los elementos y criterios de sensibilidad considerados para el análisis.

Entre los componentes físico-naturales, con sus elementos de sensibilidad, cita: el Geológico (fallamiento, litología, grado de alteración de las rocas), el

Geomorfológico (procesos, formas, pendiente), y el Hidrológico (hidrografía). A los efectos de calificar los elementos y criterios de sensibilidad que conforman a cada uno de los componentes ambientales considerados, estimó un proceso de valoración que se hizo a través del establecimiento de una escala de valores, tanto nominal como ordinal, donde se expresa la sensibilidad de cada elemento y criterio de análisis en relación con su vulnerabilidad, capacidad de recuperación ante los procesos de intervención antrópica o de desestabilización natural. Entre los elementos socio-económicos utiliza: uso de la tierra, servicios básicos y accesibilidad, los que permiten la identificación de recursos, potencialidades y restricciones para el emplazamiento o localización de actividades vinculadas al proyecto de la ZOLCCYT.

En relación al ASA relacionado a derrames petroleros, se encuentran las siguientes referencias. Michel et al (1.978) aplican un Índice de Vulnerabilidad ante derrames petroleros en la línea de costa de la Ensenada Lower Cook, Alaska. Clasificaron 1.216 km de costa en tres tipos: erosionales (escarpes y taludes, 45 %), neutrales (estables, sin aparentes cambios horizontales en la costa, 38 %) y deposicionales (deltas o bancos de arena, 17 %). Los anteriores fueron subdivididos en 16 subclases basados en características morfológicas de pequeña escala, para de esta forma predecir la permanencia del petróleo en los diferentes ambientes costeros de la ensenada o caleta.

En base a tres casos de estudio evaluados, y revisión de literatura, formularon una clasificación de vulnerabilidad de ambientes costeros ante derrames petroleros. La clasificación está basada principalmente en la longevidad física del petróleo en cada ambiente en ausencia de esfuerzos de limpieza. Describen los siguientes ambientes costeros y sus respectivas vulnerabilidades (en orden creciente de sensibilidad) ante los derrames petroleros:

- 1.- Promontorios/Farallones rocosos
- 2.- Plataformas erosionales por acción de olas
- 3.- Playas planas de arena de grano fino
- 4.- Playas con pendiente de grano medio a grueso

- 5.- Planicies fangosas y de arena fina intermareal (expuestas al viento y corrientes)
- 6.- Playas de arena y grava mezcladas
- 7.- Playas de grava
- 8.- Farallones rocosos protegidos
- 9.- Planicies de estuarios intermareal protegidos
- 10.- Marismas salinas estuarinas protegidas

En una escala del 1 al 10, consiguieron que el 45 % de la línea de costa (principalmente zonas con escarpes, oleaje fuerte, playas de arena fina) tenía valores bajos, 1 a 4, lo que significaba que el petróleo podía ser dispersado por procesos naturales dentro de los primeros 6 meses después del derrame. Valores de 4 a 6 fueron asignados al 13,4 % de la línea de costa (mezcla de playas de arena fina y gruesa), donde la permanencia del petróleo se alargaba de 6 meses a 1 año. Por último, valores de 6 a 10 fueron asignados al 41,5 % de la costa (costas encerradas, abrigadas, de poco oleaje, playas de grava donde el petróleo puede penetrar más), donde la contaminación del petróleo podía permanecer de 2 a 10 años, o posiblemente por más tiempo, si no se iniciaban procedimientos de limpieza. Proponen que el uso de este tipo de índice, en conjunto con un índice de susceptibilidad biológica y modelos de la trayectoria del petróleo, podría proveer fundamentos para el proceso de toma de decisiones en la ubicación de recursos y prioridades de limpieza, métodos específicos de protección de ambientes más vulnerables, en los planes de contingencia.

Los autores Jensen et al (1.990, 1.993 y 1.998) desarrollaron tres aplicaciones de Índice de Sensibilidad Ambiental (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.

Específicamente, Jensen et al (1.990) presentan un Índice de Sensibilidad Ambiental (ISA) ante derrames petroleros utilizando Sensores Remotos y Sistemas

de Información Geográfica, para la Isla Marco, Estado de la Florida, USA. El Sistema ISA para el mapeo de ambientes costeros sensibles a los derrames petroleros y de información de recursos de vida silvestre, fue desarrollado para guiar a los coordinadores de respuesta a los derrames petroleros, para evaluar los peligros probables asociados a tales derrames, así como planificar y ejecutar efectivamente operaciones de control de derrames. Utilizan la siguiente información y factores ambientales: Mapa base planimétrico, Índice de Sensibilidad de la Costa, Vida Silvestre sensible a los derrames, y Características de acceso y protección.

Los anteriores autores utilizan los criterios de evaluación y componentes ambientales siguientes. La información sobre el Índice de Sensibilidad de la línea de costa identifica diez o más tipos de ambientes costeros cada uno teniendo varios niveles de sensibilidad a contaminantes derramados y distintas recomendaciones para respuestas de emergencia y limpieza. Los tipos de líneas de costa están secuencialmente ordenados basados en las interacciones conocidas petróleo-línea de costa que han sido observadas a lo largo de 20 años anteriores a su estudio. El mapa ISA para la Isla Marco generado describe los ambientes más sensibles: manglares y ciénagas expuestas (numero 10) en rojo brillante, mientras que rocas verticales expuestas y farallones marinos (numero 1) son mostrados en negro, los menos sensibles.

Tal información de sensibilidad ambiental puede verse simple a primera vista, pero **es precisamente ésta sencillez la que hace posible las rápidas y efectivas decisiones a ser hechas en el momento de un derrame petrolero u otro desastre.** Básicamente, los farallones marinos y las playas arenosas expuestas son menos sensitivas ya que son usualmente limpiadas por fuerzas naturales (el oleaje) o pueden ser limpiadas fácilmente por el hombre. Al contrario, áreas tales como los manglares son muy difíciles de limpiar indiferentemente de que estén expuestos o no. Afirman que mucha de la información de sensibilidad puede ser generada usando datos normalmente disponibles de imágenes satelitales LANDSAT o SPOT, Jensen et al (1.990). La distribución de la vida silvestre sensible al petróleo es descrita por símbolos diseñados para hacer posible que los decisores rápidamente evalúen las

prioridades de acciones de respuesta (ej: cerrar áreas de pesca comercial, activar equipos de limpieza de aves.). Las características biológicas incluyen: mamíferos marinos, reptiles, peces, conchas marinas y aves.

Igualmente, Jensen et al (1.993) desarrollaron un Índice de Sensibilidad Ambiental, apoyándose en información de sensores remotos (Landsat-TM) y mediante un SIG clasificaron la sensibilidad de la línea de costa de los Emiratos Árabes Unidos. Determinaron los siguientes tipos de costa y les asignaron sus respectivas sensibilidades (en orden creciente de sensibilidad):

- 1.- Estructuras casi verticales (Farallones), Playa rocosa natural
- 2.- Plataformas expuestas al oleaje
- 3.- Playa de arena fina o banco dragado
- 4.- Playa de grano medio a grueso o mezcla de arena con grava
- 5.- Playas de grava
- 6.- Planicie de sedimento mezclado intermareal
- 7.- Playa rocosa cubierta de lodo
- 8.- Playa de arrecife coralino
- 9.- Planicie protegida intermareal
- 10.- Superficies de algas protegidas
- 11.- Manglar

Posteriormente, el mismo autor con otros investigadores, Jensen et al (1.998), presentan una versión mejorada el mismo método de ISA, desde un enfoque de sistemas, y mediante un índice denominado Índice de Sensibilidad Ambiental para el mapeo de planes de contingencia y respuesta ante derrames petroleros, presentando un ejemplo en la costa de la Florida. Citan diferentes componentes y factores ambientales, de acuerdo a si están en condición de estuarios, lacustres o ribereñas, información sobre sensibilidad de la costa (Geomorfología de la línea de costa, hábitats), información biológica (Especies protegidas o en peligro de extinción, de importancia recreacional o comercial o ecológica) mapeadas en su extensión espacial y temporal, áreas de máxima concentración o etapa de la vida más vulnerable.

### - Comentarios sobre los antecedentes

De acuerdo a la anterior revisión, se puede concluir que existen diferentes formas de evaluar la sensibilidad de los diferentes componentes ambientales, sean físico-naturales o socio-económicos. En cualquier caso se deben conocer los componentes ambientales que caracterizan la línea de costa. Igualmente, se debe solicitar opinión de expertos en cuanto a esos componentes, y así determinar o valorar las diferentes sensibilidades que manifiestan tales componentes. Parte del problema a resolver es la adaptación de información con carácter geoespacial, esto es, coberturas terrestres a lo largo de la línea de costa que representan diferentes tipos de usos y coberturas de la tierra, con diferentes sensibilidades a valorar o ponderar, en un ambiente SIG. El proceso de ponderación se considera aquí como primordial, ya que mediante éste se definen las sensibilidades finales.

Igualmente, se puede afirmar que el proceso de valoración o ponderación de los componentes no debe ser rígido, debe permitir o tener cierta flexibilidad, ya que, como se afirmó anteriormente, el ambiente en si mismo es cambiante tanto en el tiempo como en el espacio, posee límites variables y gradaciones que nos obligan a tomarlas en cuenta al hacer decisiones sobre sus características intrínsecas y sobre sus cualidades, lo que implica consecuencias sobre las medidas a tomar en función de tales valoraciones; por lo tanto, se considera que un modelo ideal, o al menos adecuado, debe permitir reflejar tal condición.

Para llegar a una solución adecuada se puede hacer uso de métodos y técnicas que nos permitan convertir tal información en coberturas que puedan ser manejadas mediante el SIG y que representen las características anteriormente nombradas. En la siguiente parte se revisan y evalúan diferentes métodos de ponderación, de manera tal de tener una idea y así seleccionar y proponer los más adecuados de acuerdo a los objetivos expuestos. En posteriores capítulos se proponen y evalúan las diferentes técnicas de modelaje para la solución del problema planteado.

### **I.3.- Métodos de Ponderación**

En relación a la ponderación de la importancia de los factores o componentes del medio sobre los que se toma una decisión, Canter (1.997) afirma que si se utiliza un sistema de ponderación de la importancia en la toma de decisiones, el elemento crítico es el uso de un método eficaz de asignación de pesos de importancia a los distintos factores de decisión o, al menos, un método que ordene los factores en rangos según su importancia. Lista las siguientes técnicas de ponderación: Jerarquización, Proceso Nominal-Grupo, Puntuación, Escala de Importancias definidas, Medida de utilidad multiatributo (o multicriterio), Comparación en pares no jerarquizados, Comparación de pares jerarquizados y Método Delphi. Más adelante se hará una breve descripción de algunas de ellas, en función de su pertinencia y de su inclusión en la descripción hecha por otros autores, incluidos más adelante.

Otro autor, Gómez Orea (1.999) explica los siguientes métodos que se pueden aplicar a la valoración de aquellos elementos para los que no existe una unidad de medida, y respecto de los cuales la sensibilidad (punto de vista) de los diferentes agentes y actores sociales es diferente. Estos métodos tienen una aplicación evidente en las Evaluaciones de Impacto Ambiental. Una de las más interesantes se refiere a la ponderación o medida de la importancia relativa (nivel de sensibilidad en este estudio) de los factores (tipos de costa en este caso) ambientales, necesaria para totalizar el impacto ambiental de un proyecto, pero también es útil para valorar clases de factores ambientales cualitativos (en este caso sensibilidad) o para jerarquizar los objetivos de un proyecto.

De acuerdo a lo anterior, la primera tarea del método de valoración aplicable consiste en seleccionar un grupo de personas, al que se denomina panel de expertos, que intervienen como jueces en la valoración; para que ésta sea creíble, dicho panel ha de cumplir dos condiciones:

- representar a todos los grupos de interés social implicados en el tema, de manera que cada grupo debería estar representado por un panelista

- cada panelista debe estar iniciado en el conocimiento del tema a valorar y en lo que significa la valoración, de ahí la condición de experto que se asigna al panel.

Los métodos citados por Gómez Orea (1.999) son: Consulta tipo Delphi, Ordenación por Rangos, Clasificación por Rangos escalares, Comparación por Pares y Comparación por Pares Ordenados. A continuación se hace una descripción breve de cada uno de ellos (en algunos se incluye la traducción al inglés para reconocerles en la literatura inglesa y extraídos de otros autores).

### **I.3.1.- Consulta tipo Delphi**

El método Delphi, cuya frecuente utilización le ha hecho ya clásico, es una forma de consulta sistematizada a un panel de expertos que, basándose en el anonimato, evita el deslizamiento del resultado hacia las posturas de los miembros con más capacidad de influencia sobre los panelistas. Consiste en someter un cuestionario preparado al efecto, a un panel de expertos, cada uno de cuyos miembros lo formaliza de manera individual y anónima; el director de la encuesta analiza las respuestas y prepara una síntesis de ellas que envía a cada panelista para que elabore una nueva respuesta a la vista de dicha síntesis; este ciclo se repita hasta que se considera que la reiteración no va a mejorar la convergencia de las opiniones de los panelistas.

### **I.3.2.- Ordenación por rangos (Ranking methods)**

En esta técnica el responsable pide a cada miembro de un panel establecido que ordene jerárquicamente los elementos a valorar (factores, objetivos, medidas, etc.) en términos relativos; dichos elementos deben estar definidos al mismo nivel de abstracción.

### **1.3.3.- Clasificación por rangos escalares (Rating methods)**

En este método cada participante del panel sitúa cada uno de los elementos a valorar sobre una escala preestablecida; se admiten empates. Esta escala puede tener cualquier dimensión, pero es frecuente que varíe de 0 a 10.

### **1.3.4.- Comparación por Pares (Pairwise comparison)**

Este método será descrito en detalle en el aparte de la Evaluación Multicriterio.

### **1.3.5.- Ordenación y Comparación por Pares (Comparación en pares jerarquizados)**

Este procedimiento, utilizado en las primeras versiones del método de evaluación de impactos Batelle-Columbus, se desarrolla en los siguientes pasos que debe ejecutar cada panelista:

- 1.- Ordenar los elementos de mayor a menor importancia
- 2.- Establecer una relación proporcional entre ellos
- 3.- Repartir 100 puntos de valor entre los diversos elementos

El valor final asignado es la media de los obtenidos por los panelistas.

En relación a las técnicas de evaluación de pesos, ya en el campo de los SIG, Malczewski (1999) expone que éstas difieren en términos de su exactitud, grado de facilidad de uso y comprensión por parte del usuario, y su fundamentación teórica. Describe las técnicas Rango u Ordenación (Ranking), Clasificación o Tasación (Rating), Comparación por Pares (Pairwise comparison), y Análisis de Compensación o Intercambio (Trade-off Analysis). Además, discute sobre su disponibilidad en el contexto de programas de computación y la forma en que pueden ser incorporados en el análisis de decisión multicriterio basado en un SIG.

Ya vistas versiones de los primeros se describirá brevemente el método del Análisis de Compensación (Trade-off Analysis). Este método hace uso de evaluaciones directas de las compensaciones que el decisor desea hacer entre los pares o alternativas. Las compensaciones definen un único juego de pesos que permitirán a todas las alternativas igualmente preferidas en las compensaciones obtener el mismo valor o utilidad. El enfoque requiere que el decisor compare dos alternativas (digamos A y B) con respecto a dos criterios a la vez y evalúe cuál alternativa es preferida. Específicamente, el decisor debe determinar si la alternativa A es preferida en relación a B, la alternativa B es preferida en relación a A, ó si se es indiferente ante las alternativas. Preguntando varias veces tales preferencias, se puede deducir cuánto peso le asigna el decisor a los diferentes criterios. Primordialmente se asume, en este método, que las compensaciones que el decisor está dispuesto a hacer no dependen en los niveles de los otros criterios.

### **1.3.6.- Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC)**

Con el fin de no sobrecargar el texto con referencias, se aclara que, salvo cita diferente, lo relativo a EMC es tomado de Barredo (1996). Igualmente, se aclara que en éste trabajo, se estructura una adaptación de la EMC al ASA, es decir, la EMC, en el ámbito de los SIG, es tradicionalmente utilizada para asignar usos de la tierra o actividades en función de diferentes factores. En este caso se utilizará para determinar los diferentes niveles de sensibilidad de los componentes ambientales presentes en el área de estudio en función de diferentes factores e indicadores ambientales, mediante la generación de pesos. Se aprovechará su potencial para la ponderación y ordenación, para de ésta forma, mediante la consulta con expertos, determinar la variabilidad de la vulnerabilidad de los mismos.

La Evaluación Multicriterio puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones. Su objetivo principal es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto; según esto, es posible generar soluciones compromiso y jerarquizaciones de las alternativas de acuerdo a su grado de atracción (Janssen y Rietveld, 1.990,

citados por Barredo, 1.996). La EMC se fundamenta en la evaluación de una serie de alternativas basándose en una serie de criterios. Un método de EMC puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente una serie de alternativas a partir de criterios que hayamos considerado pertinentes en una evaluación, Eastman et al. (1.993).

Se debe destacar la importancia de la fase de asignación de valores a las alternativas por parte del centro decisor, ya que frecuentemente las variables o criterios a evaluar no están medidos en escala de intervalo o razón, sino que se presentan frecuentemente en los SIG en escala nominal, recayendo en el centro decisor o en el equipo planificador la responsabilidad de la asignación de valores cuantitativos a las categorías correspondientes a cada criterio según una serie de referencias previas, marcando ésta etapa indudablemente el resultado del proceso de evaluación. Es bueno conocer dos conceptos relacionados al tema: Decisión y Alternativa. Una Decisión es una selección entre alternativas (o posibilidades de elección), las cuales pueden presentar diferentes cursos de acción, hipótesis, localizaciones u otros conjuntos de elementos. En el entorno de los SIG, las Alternativas están representadas por objetos o unidades espaciales, superficies, celdas en el modelo raster, o polígonos, líneas o puntos en el modelo vectorial.

Para lograr una visión global de los componentes que constituyen el proceso EMC en el entorno de los SIG, se presenta a continuación un diagrama que permite visualizar dichos elementos (Figura I.2), tales elementos serán descritos más adelante.

### **I.3.6.1.- Componentes de la EMC**

En la figura I.2 se pueden observar los componentes de la EMC, estos son: los Objetivos, los Criterios (Factores y Limitantes), la Regla de decisión, las Funciones de selección y Selección heurística. La misma será explicada adaptándola a nuestro caso de estudio.

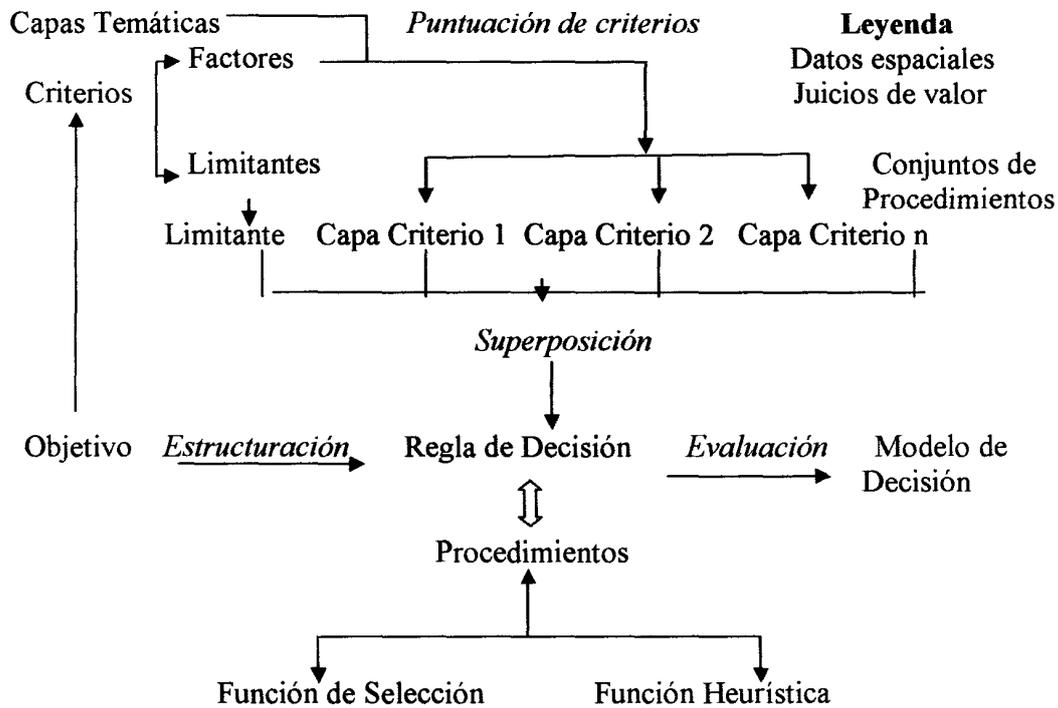


Figura I.2.- Integración SIG-EMC (tomado de Barredo, 1.996)

**- Los Objetivos**

Un objetivo es algo que uno quiere lograr, alcanzar u obtener; los objetivos son un elemento básico para el desarrollo de un proyecto de EMC, ellos pueden ser múltiples en determinados problemas de planificación, decisión o localización/asignación de actividades. Con lo cual nos podemos plantear una evaluación multiobjetivo, objetivos que a su vez pueden ser complementarios o conflictivos. Nuestro objetivo fue identificar los componentes ambientales más sensibles, con posteriores fines de diseño de programas de protección o restauración.

**- Los Criterios: Factores y Limitantes**

Un criterio es “cierta base para la toma de decisión, base que puede ser medida y evaluada, es la evidencia sobre la cual se basa una decisión”, Eastman et al. (1.993). Otra definición: “es un aspecto medible de un juicio, por el cual una

dimensión de las alternativas bajo consideración puede ser caracterizada” (Voogd, 1.983, en Barredo, 1.996). La forma como puede ser medido o caracterizado el criterio es un aspecto de trascendental importancia, ya que de ello dependerá en gran parte el resultado final del proceso de evaluación. La puntuación de los criterios (valoración de las alternativas) puede considerarse como el paso inicial del proceso de EMC en el cual recae gran parte del éxito o fracaso de la evaluación desarrollada.

Los criterios pueden ser de dos tipos: Factores y Limitantes. Un factor es un criterio que realza o detracta la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, éste por lo tanto debe ser medido en una escala continua, Eastman et al. (1.993). Adaptando el método a nuestro caso, se busca que los criterios definan las diferentes susceptibilidades en la línea de costa, podemos definir el criterio “Tipo de costa”, de manera tal que pudieran ser más sensibles o vulnerables las costas de manglar que las costas de playa arenosa. También, otro criterio puede ser “Distancia a la orilla”.

El criterio de tipo limitante restringe la disponibilidad de algunas alternativas según la actividad evaluada, con este tipo de criterio se excluyen varias categorías de la capa analizada para la evaluación; es decir, se genera una capa binaria en la cual un código (1) representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro (0), la no disponibilidad para la actividad. Siguiendo nuestro caso, definir las diferentes sensibilidades, serían de tipo limitante las áreas fuera de un corredor o “buffer” de 100 m a lo largo de la línea de costa, así como el cuerpo de agua del Lago, ya que al ocurrir la contingencia, el derrame, ya éste se vería afectado, y el objetivo es conocer la sensibilidad para proteger los elementos costeros. El criterio Limitante también puede ser expresado como alguna característica que la solución final puede poseer, Eastman et al. (1993); en éste caso podría pedirse que las zonas evaluadas y clasificadas como más sensibles tengan algún tipo de accesibilidad mínima, sea por mar o por tierra. Una vez que las capas temáticas correspondientes a los criterios han sido generadas, pueden ser combinadas a través de la regla de decisión para lograr la evaluación.

### - La Regla de Decisión

La Regla de Decisión es el procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular, pudiendo también comparar a través de ella distintas evaluaciones con el fin de variar alguno de sus aspectos en el caso de ser necesario. Una regla de decisión puede referirse a aplicar un umbral basándose en un criterio simple. Continuando con nuestro caso, si tenemos el criterio tipo de costa y la cobertura “costa con manglar”, se le pide al sistema que seleccione como muy sensible a tal tipo de costa, y se considera que esa área debe ser puesta en prioridad de planes de limpieza. Sin embargo, la regla de decisión puede ser compleja cuando se pretende integrar en ella una serie de criterios distintos (EMC), en este caso, los métodos de EMC proporcionan procedimientos que permiten integrar de manera coherente los criterios implicados en la toma de una decisión a través de reglas de decisión específicas.

En la figura I.2 se puede observar que las capas temáticas resultantes de los criterios (capa-criterio) son un insumo de la regla de decisión, la cual las integra en un solo conjunto de datos, evaluándolos de modo que se genera una capa final (modelo de decisión), donde cada dato o alternativa espacial ha recibido un valor, orden o rango de capacidad según la actividad evaluada. “Una regla de decisión está estructurada a partir de una serie de procedimientos (aritmético-estadísticos) que permiten integrar los criterios establecidos en un índice de simple composición, puede proporcionar la manera de comparar las alternativas utilizando dicho índice”, Eastman et al. (1.993).

### - Funciones de Selección y Selección Heurística

La Regla de Decisión puede realizar a priori dos tipos de procedimientos, a saber: La Función de Selección y La Selección Heurística. En el primer caso (Función de Selección), la regla de decisión ofrece un medio matemático para comparar las alternativas, realizando algún tipo de optimización (como maximizar o minimizar alguna característica medible), para lo cual requiere teóricamente que cada

alternativa sea evaluada, Eastman et al. (1993). Por otro lado, la función heurística específica un procedimiento a seguir, en vez de una función a evaluar, es muy usada debido a su simplicidad de comprensión e implementación. El primer procedimiento intenta clasificar (también puede jerarquizar) las alternativas en función de una característica medible, que usualmente es el valor de capacidad de acogida (R1), mientras que la selección heurística persigue obtener una selección de sólo algunas alternativas del conjunto global de ellas.

Barredo (1996) ofrece el siguiente ejemplo para entender mejor lo anterior. Supóngase que se está implementando un modelo de decisión para evaluar la capacidad de una región para desarrollar un asentamiento urbano, así, a través de la función de selección se podrían definir las áreas susceptibles de ser urbanizadas, así como las que no lo son, o bien formar grupos jerárquicos de capacidad de urbanización, mientras que con una función heurística se podría seleccionar las mejores áreas para el asentamiento urbano.

Continuando con éste caso, a través de la función de selección se podrían definir áreas sensibles y no sensibles, o bien formar grupos jerárquicos con necesidad de ser protegidos (por su sensibilidad intrínseca); mientras que con una función heurística se podría seleccionar y priorizar las áreas más sensibles a ser protegidas. El primer procedimiento clasifica, mientras que el segundo selecciona.

### **- La Evaluación**

La regla de decisión es alimentada con los criterios, sin embargo, se estructura a partir de los objetivos, los cuales son propuestos inicialmente por el centro decisor en función de la evaluación que se pretenda realizar y las expectativas de planificación o desarrollo de actividades que se hayan planteado al inicio del proceso general de evaluación. El objetivo inicial de la evaluación puede desglosarse en una serie de objetivos específicos que indiquen cómo va a actuar la regla de decisión; asimismo, los criterios son estructurados en buena medida a partir de los objetivos propuestos, es decir, cada objetivo puede ser representado por uno o varios

criterios, con cuya optimización (maximización o minimización) se lograrían los objetivos.

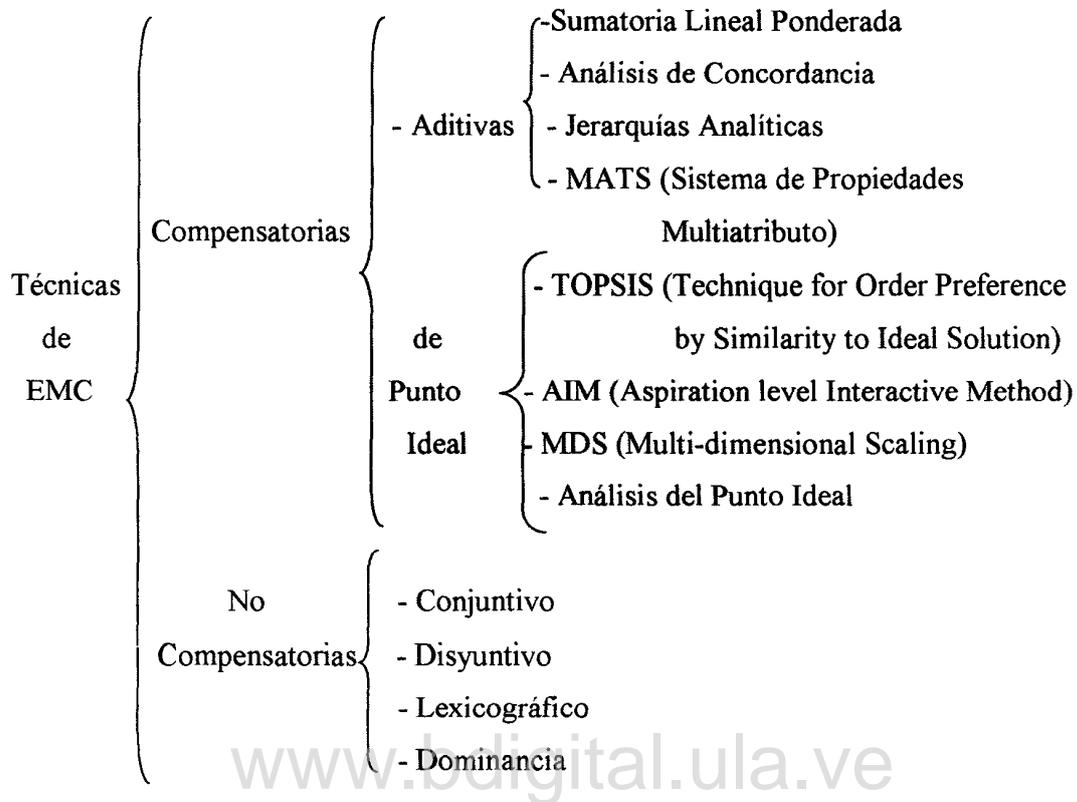
El objetivo general, determinar áreas sensibles, puede establecer cómo va a proceder la regla de decisión al evaluar los criterios, es decir, para lograr un modelo de decisión de áreas sensibles, se deben tener en cuenta criterios como: playas arenosas o no, ecosistemas frágiles, costas urbanas, que se estructurarán como capas-criterio, para posteriormente ser evaluados por la regla de decisión con el fin de establecer el modelo final. Una vez que la regla de decisión ha sido estructurada, el proceso de aplicarla sobre las capas-criterio se llama evaluación, que producirá finalmente el modelo de decisión.

#### **I.3.6.2.- Métodos de EMC**

Los distintos métodos o técnicas de EMC se diferencian básicamente en los procedimientos aritmético-estadísticos que realizan sobre las matrices de evaluación y de prioridades, con lo cual se obtiene una evaluación final de las alternativas. Según el método empleado se efectúan diferentes operaciones aritméticas, pueden ser simples, como la del método de Sumatoria Lineal Ponderada, aplicado frecuentemente en modelos desarrollados en SIG. Otros métodos requieren realizar operaciones aritméticas de mayor dificultad, tales como el Análisis del Punto Ideal (API), el Análisis de Concordancia-Discordancia (ACD), el método de Optimización Jerárquica (OJ) y la Programación Lineal, entre otros, Barredo (1996).

#### **- Técnicas compensatorias y no compensatorias**

Una clasificación de métodos de EMC desde el punto de vista del tipo de procedimientos que desarrollan es presentada por Jankowski (1.995) y modificada por Barredo (1996), en ella las técnicas de EMC son clasificadas según el nivel del proceso de demanda cognitiva que requieren del centro decisor, y el método de agregación de puntuaciones de criterios y prioridades establecidos. Se diferencian dos grupos de técnicas EMC: compensatorias y no compensatorias (ver figura I.3).



**Figura I.3.** Clasificación de técnicas de Evaluación MultiCriterio (tomado de Barredo, 1.996)

Las técnicas compensatorias son las que demandan un mayor proceso cognitivo, dado que requieren que el centro decisor especifique los pesos de los criterios como valores cardinales o funciones de prioridad, mientras que las no compensatorias demandan un menor proceso cognitivo del centro decisor, ya que por lo general requieren una jerarquización ordinal de los criterios basada en las prioridades del centro decisor. En otras palabras, en el primer grupo de técnicas deben establecerse los pesos de los criterios ( $W_j$ ) de manera numérica en escala de razón, lo que puede llevarse a cabo a través de algún procedimiento para tal fin.

Por otro lado, en las no compensatorias los procedimientos se pueden llevar a cabo indicando un valor ordinal o bien el orden de importancia de los criterios, sin establecer un peso de manera cuantitativa. Además, en las técnicas no compensatorias un valor bajo en un criterio no puede ser compensado o equilibrado

por un valor alto en otro criterio, aquí, las alternativas son comparadas en todos los criterios sin realizar operaciones entre los criterios.

#### **- Evaluación Multicriterio, uniobjetivo y multiobjetivo**

La EMC puede basarse en uno o varios objetivos, pudiendo ser simples o múltiples, y dentro de los múltiples, complementarios o conflictivos, con lo cual se originan las combinaciones lógicas entre objetivos-criterios que pueden suceder en una evaluación. Podemos tener desde la combinación más simple: uniobjetivo con un solo criterio, pasando por uniobjetivo con varios criterios, hasta multiobjetivo, con criterios complementarios o conflictivos, como ya se dijo.

#### **- Multicriterio uniobjetivo**

En este tipo de evaluación es donde las técnicas de EMC centran su potencial; es la más frecuentemente empleada en los SIG, con esta estructura pueden ser llevados a cabo distintos planteamientos y proyectos. Así, a partir de un objetivo único se establece un conjunto de criterios que de alguna manera incidan en la actividad evaluada; posteriormente, con la integración de los criterios, en forma de capas temáticas en la regla de decisión, se obtiene el modelo (capa temática) con las soluciones pretendidas por el objetivo. En dicho modelo cada dato espacial ha recibido un valor, proveniente de un índice que indica, de mayor a menor, la capacidad de cada alternativa frente a la actividad evaluada.

Como ejemplo de esta opción, se puede citar el caso de seleccionar y priorizar áreas sensibles ante un derrame petrolero (el objetivo), tomando en cuenta el tipo de costa (playas arenosas, ecosistemas frágiles, costas urbanas) y la distancia a la orilla (criterios). La opción multicriterio-multiobjetivo, cuando se hace ordenación territorial, se refiere al caso en que se quiere identificar sectores aptos para diferentes tipos de actividades, en función de diferentes criterios; opción que no es objeto de ésta investigación.

### **I.3.6.3.- Método Analítico de Jerarquización (“Analytical Hierarchy Process”, AHP)**

Es frecuente en estudios del territorio la necesidad de establecer jerarquías y pesos ( $W_j$ ) para los factores que influyen en la aptitud o el impacto para un determinado uso, asignando así a cada uno de ellos un valor relativo de ponderación frente a los demás. Se puede definir el objetivo de la ponderación como llegar a expresar, en términos cuantitativos, la importancia (en este caso niveles de sensibilidad) de los distintos elementos para acoger o ser afectados por una determinada actuación (CEOTMA, 1.991, citado por Barredo, 1.996).

En relación con el aspecto de la asignación de pesos a una serie de factores, se han descrito una serie de procedimientos: puntuación, colocación de una escala ordinal, comparación por pares, método Delphi y otros. El procedimiento de **comparación por pares**, para la asignación de pesos, ofrece una medida cuantitativa de la consistencia entre las relaciones que se establecen entre cada par de factores para la asignación de tales pesos. **Por lo tanto se considera que es un método adecuado para sustentar las opiniones dadas al consultar a los diferentes expertos.** A continuación se ofrece una descripción del Método Analítico de Jerarquización o MAJ (Analytical Hierarchy Process, en Saaty 1.980), que usa la comparación por pares, y que fue el utilizado para la generación de pesos en este estudio.

El MAJ parte de establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, así se establece una matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás ( $a_{ij}$ ). Posteriormente se determina el vector propio (eigenvector) principal, el cual establece los pesos ( $W_j$ ) y el valor propio (eigenvalue), que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (Saaty, 1.980).

De acuerdo a Malczewski (1.999), citando a Saaty (1980), el MAJ está basado en tres principios: descomposición, juicio comparativo, y síntesis de prioridades. El principio de descomposición requiere que el problema de decisión sea descompuesto en una jerarquía que capte los elementos esenciales del problema (objetivo principal: evaluar sensibilidades; objetivos específicos: identificar los componentes o criterios: tipos de costa, distancia a la orilla; y alternativas: sectores o zonas). El principio de juicio comparativo requiere la evaluación de comparación por pares de los elementos (tipos de costa) dentro de un nivel dado de la estructura jerárquica, con respecto a su “progenitor” en el nivel siguiente más alto (cada sector en relación a cada atributo).

Implica tres pasos: (a) desarrollo de una matriz de comparación a cada nivel de la jerarquía; comenzando por arriba y trabajando hacia abajo; (b) cálculo de los pesos para cada elemento de la jerarquía; y (c) estimación del cociente de consistencia. El principio de síntesis toma cada uno de las prioridades derivadas de la escala de cocientes en los diferentes niveles de la jerarquía y construye un juego compuesto (global) de prioridades (en este caso sensibilidades) para los elementos al nivel más bajo de la jerarquía (alternativas: sectores, píxeles o polígonos).

#### - Estructura del método

El procedimiento se inicia a partir de una matriz de comparación por pares, en este caso pares de factores, ver Figura I.4. En ésta matriz se asigna en cada celda un juicio de valor ( $a_{ij}$ ), que representa la importancia relativa de cada factor (en la columna principal) con otros (de la fila principal); así, por ejemplo, podemos expresar que el factor C es 3 veces más importante que el factor B en la celda correspondiente ( $a_{cb}$ ). De ésta manera, con una escala establecida por el procedimiento, se asignan los juicios de valor a todas las celdas de la matriz. Sin embargo, hay que hacer notar que en la diagonal solamente se asignan valores 1 que denoten la igualdad en la comparación de cada factor consigo mismo. Por otra parte, en este procedimiento la matriz que se produce es recíproca, es decir, los valores asignados a ambos lados de la diagonal son inversos; siendo esto lógico,

considerando que si el factor C es 3 veces más importante que B, entonces B será en este caso 1/3 veces menos importante que C, con lo cual la asignación de juicios de valor en esta matriz se reduce a la diagonal y a la mitad inferior izquierda.

Factores	A	B	C	D
A	1			
B	aba	1		
C	aca	acb	1	
D	ada	adb	adc	1

Figura I.4. Matriz de Comparación por Pares

La escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor ( $a_{ij}$ ) es una escala de tipo continuo (de razón) que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9, definida por Saaty (1.980), respectivamente, como extremadamente menos importante (1/9) hasta extremadamente más importante (9), indicando el valor 1 igualdad en la importancia entre pares de factores; ésta escala se presenta a continuación: 1/9 1/7 1/5 1/3 1 3 5 7 9

Dónde: 1/9 = extremadamente menos importante  
 1 = igualmente importante  
 9 = extremadamente más importante

Se adoptará esta escala ya que es la que está incluida en el programa SIG a utilizar. Las categorías que restrinjan la evaluación, en este caso de niveles de sensibilidad, pudieran ser todos los sectores que no se encuentren en la línea de costa, no se deben incluir en el proceso de valoración; a éstas se les asigna un valor que las diferencia en la evaluación para segregarlas de los procesos de cálculo.

Basados en esta escala, se puede asignar a cada par de factores ( $a_{ij}$ ) un juicio de valor de importancia relativa frente a una actividad propuesta. Se hace notar que

en el presente estudio se diseñaron las encuestas, repartidas a los expertos, con esta escala modificada y adaptada a la temática que nos concierne, la sensibilidad (Anexo 1).

**- Cálculo del Vector propio principal**

En relación con la matriz de comparación, a partir de una serie de juicios de valor entre pares de factores, el asunto concierne ahora al cálculo de una serie de pesos ( $W_j$ ) que describen en términos aritméticos precisos (Saaty, 1980), cómo deberían relacionarse con los juicios ( $a_{ij}$ ), es decir, las características que deben describir los pesos en relación con los juicios establecidos. Una vez establecidos los juicios de valor en la matriz de comparación por pares, el procedimiento establece el cálculo del valor propio principal de la matriz, el cual representa el orden de prioridad de los factores (éstos se indican para los ubicados en las filas), mientras que el valor propio máximo ( $\lambda \text{ max.}$ ) de la matriz es una medida de la consistencia de los juicios (ver Figura I.5).

Factores	A B C D	Vector propio principal
A		Ea
B		Eb
C		Ec
D		Ed

**Figura I.5. Matriz de comparación por pares con vector propio principal**

El vector propio principal es posteriormente normalizado para así obtener el vector de prioridades; el cálculo del vector propio puede llevarse a cabo a través de diferentes procedimientos matemáticos, sin embargo, todos redundan en establecer una relación entre los juicios iniciales y los valores de vector propio principal obtenido.

El procedimiento que se utilizará en este trabajo para obtener el vector propio principal consiste, en primer lugar, en obtener los valores de la matriz de comparación normalizados por columnas, esto es,  $N_{a11} = a_{11} / \sum a_{1j}$ , así, el valor normalizado para cada celda se obtiene a partir del cociente entre cada valor ( $a_{ij}$ ) y el valor de la sumatoria de cada columna, posteriormente los valores normalizados se suman por filas, obteniendo así el vector propio principal, el cual se normaliza dividiendo cada uno de los valores de dicho vector entre  $n$  (número de factores), obteniendo de esta manera el vector propio principal normalizado que representa los pesos ( $W_j$ ) de cada factor (ver figura I.6).

**- Evaluación de la Valoración**

El paso siguiente a la obtención del vector propio principal es uno de los aspectos más importantes e interesantes del MAJ, esto diferencia al método de los demás de asignación de pesos, ya que indica un dato cuantitativo acerca de la consistencia en la asignación de los juicios de valor; es decir, igual que en otros métodos, la asignación de los juicios de valor, aunque se base en criterios sólidamente establecidos, siempre conlleva una cuota más o menos importante de **incertidumbre o subjetividad**, ya que en todo proceso de decisión humano estos factores son inevitables.

Factores	A B C D	Vector propio pcpal	Vector propio pcpal Normalizado ( $W_j$ )
A		$\sum A$	$\sum A/n$
B		$\sum B$	$\sum B/n$
C		$\sum C$	$\sum C/n$
D		$\sum D$	$\sum D/n$

**Figura I.6. Factores y Vectores propios calculados y normalizados.**

Así, este procedimiento permite el cálculo del valor propio máximo, a través del cual se establece una medida operativa de consistencia en la asignación de los

juicios de valor ( $a_{ij}$ ), lo que también permite reconsiderar dicha asignación en caso de que no se considere consistente. El valor que ofrece éste procedimiento para el cálculo de la consistencia es el Cociente de Consistencia (“Consistency ratio”,  $Cr$ ), dicho valor se establece a partir del cociente entre el valor del índice de consistencia (“Consistency index”,  $Ci$ ) y el índice aleatorio (“Random index”,  $Ri$ ):

$$Cr = Ci / Ri$$

Concretándose así que para valores de  $Cr$  mayores o iguales a 0.10 los juicios de valor deben ser revisados, ya que no son lo suficientemente consistentes para establecer los pesos ( $W_j$ ); si, por el contrario, el  $Cr$  es inferior a 0.10, se pueden considerar satisfactorios los juicios de valor asignados. El  $Ci$  es un valor obtenido a partir del vector propio máximo ( $\lambda \max$ ) de la manera siguiente:

$$Ci = (\lambda \max - n) / (n-1)$$

Siendo  $n$  el número de factores en la matriz de comparación, mientras que el valor del vector propio máximo ( $\lambda \max$ ) se obtiene a partir del producto del vector propio principal normalizado por la matriz de comparación de factores, obteniendo así un nuevo vector, en el cual se divide cada uno de sus componentes entre su correspondiente en el vector propio principal normalizado, obteniendo un segundo nuevo vector, en el cual se suman sus componentes y se dividen posteriormente entre  $n$ , obteniendo así el vector propio máximo ( $\lambda \max$ ), que se utiliza en la estimación de la consistencia como un reflejo de la proporcionalidad de las preferencias implícitas en los juicios de valor asignados, así, cuanto más próximo sea  $\lambda \max$  a  $n$ , más consistente será el resultado de la matriz de comparación.

Por otra parte, el  $Ri$ , representa el Índice de Consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de una escala de 1 a 9, con juicios de valor recíprocos y diagonal = 1. En relación con la consistencia en la asignación de pesos, se puede partir de una abstracción teórica para conocer lo que sería consistencia perfecta, esto es, suponiendo una matriz en la cual los factores representan

determinados objetos con pesos o medidas exactos, a partir de los cuales podríamos establecer una proporcionalidad igualmente exacta, para cada par de objetos. Así, si el objeto A mide 123 cm y el B 43 cm, entonces se puede establecer que A es 2.86 veces más largo que B, y así para cada par de objetos.

De esta manera se obtiene una matriz de juicios de valor consistentes, es más, se puede establecer que dicha matriz tiene la máxima consistencia posible en caso de que las medidas sean perfectas; sin embargo los juicios de valor establecidos por los humanos no gozan de dicha consistencia, incluso los juicios o preferencias de los humanos pueden llegar a ser intransitivos, sin suponer eso un error de juicio (May, 1.954, citado por Barredo, 1.996).

#### **- Conclusión.**

Como se puede notar, la EMC es útil cuando se quiere asignar los respectivos pesos o importancias a los factores que juegan un papel en la determinación de diferentes sensibilidades, incluso, específicamente el MAJ, facilita una medida de la consistencia de las diferentes opiniones emitidas y la forma de manejar de forma razonable diferentes opiniones. En este caso se quiere determinar las diferentes sensibilidades de los componentes de la línea de costa, para esto se utiliza la opinión de expertos en el área sobre qué consideran ellos es más o menos sensible, lo anterior se logra mediante encuesta diseñada para tal fin y aplicando el MAJ, proceso que se explicará más adelante.

#### **I.3.7.- Comparando los métodos**

Los métodos difieren en forma importante de muchas maneras. De acuerdo a Malczewski (1999), cuál método utilizar dependería de la forma en que se quiere balancear entre los siguientes aspectos: facilidad de uso, exactitud, el grado de entendimiento del decisor; los fundamentos teóricos de cada método; la disponibilidad del programa de computación; y la forma en que el método puede ser incorporado en un análisis de decisión multicriterio bajo SIG. Por ejemplo,

recomienda éste autor, si la preocupación está en la facilidad de uso y el tiempo y costo utilizados para la generación de pesos, se debe aplicar métodos de Ordenación por rangos o Clasificación por rangos escalares. Por otro lado, si la preocupación se refiere a la precisión y fundamentación teórica, son más apropiados la Comparación por Pares (integrada en la EMC) o el Análisis de Compensación. Aplicaciones empíricas sugieren que el método de comparación por pares es una de las técnicas más efectivas en la toma de decisión geoespacial, incluyendo los enfoques basados en SIG (Lai and Hopkins, 1995, en Malczewski, 1.999).

#### **I.4.- Calidad de la información geográfica**

Como se dijo anteriormente, al procesar la información ambiental con medios informáticos, como lo son los Sistemas de Información Geográfica, los Sistemas de Procesamiento Digital de Imágenes, la Cartografía Digital, los Sistemas de Posicionamiento Global y otros, se incurre en una serie de errores que son introducidos en los procesos, métodos, e inclusive por los sistemas, errores que sufren un proceso de propagación que más tarde influirá en la calidad de los productos finales buscados

Al desarrollar un ASA se requiere generar un mapa base, generalmente se trata de grandes extensiones, en este caso es especialmente así. El mapa base se genera a partir de imágenes satelitales, sea haciendo clasificaciones supervisadas o elaborando un mapa-imagen. En cualquiera de los dos casos es válido hablar de límites difusos en lo que respecta a los diferentes tipos de usos y coberturas presentes en el área estudiada. Por ejemplo, un ecosistema boscoso no tiene en todos sus bordes límites claramente definidos, es decir, no pasa siempre de bosque a sabana de forma inmediata, es muy común que haya cambios graduales. Igualmente ocurre para un ecosistema de manglar, existen zonas de transición al pasar a otro tipo de vegetación, por ejemplo a bosques inundables de otra especie. Esto es similar en zonas urbanas y de cultivos.

Si se quiere representar lo más fielmente posible los ecosistemas presentes, con la mayor parte de sus variabilidades, se deben tomar en cuenta los anteriores aspectos. Tradicionalmente, al generar un mapa de cobertura y uso, a partir de una imagen satelital, se han utilizados las clasificaciones supervisadas “duras”, éstas se basan en asumir que los límites son precisos y sin transiciones, esto afecta la calidad de la información que se está manipulando, ya que en la realidad no siempre es así.

Ya en 1991 Lunetta et al, al investigar sobre estos aspectos y específicamente sobre los sistemas de clasificación de imágenes satelitales para generar mapas temáticos, afirman que algunas de las fuentes potenciales de errores inducidos por estos sistemas son: **la ineficiencia para categorizar clases mezcladas, zonas de transición o sistemas dinámicos**; definiciones de clases ambiguas o pobremente definidas; la subjetividad humana; y, la falta de compatibilidad entre los diferentes sistemas de clasificación usados tanto con sensores remotos como con información tradicional. Además, afirman que la prioridad de investigación en la cuantificación del error debe enfatizar en el desarrollo de procedimientos estandarizados mas eficientes en la evaluación de la exactitud de los productos de sensores remotos, desarrollo de normas para la recolección de información de verificación de campo, procedimientos para la conversión raster-vector y vector-raster, evaluación de los aspectos de escala para la incorporación de información de altitud en la georeferenciación, y el desarrollo de diagramas de leyenda temáticos y geométricos confiables.

Chrisman (1.991) afirma que “calidad” es un término neutro, ajustado para un estándar nacional, y que se evocan mejor sus aspectos por la palabra “error”, la cual se considera una “cosa mala”; en resumen, las disciplinas de tecnología de mapeo intentan reducirlo o minimizar su importancia. Continúa el mismo autor afirmando que reportar el error, en otras disciplinas (físicas, biológicas, ciencias sociales, etc) no es signo de debilidad, ya que provee información crucial que debe ser preservada para la correcta interpretación. Argumenta que el error es parte integral del procesamiento de la información espacial, y, en vista de que es algo inevitable, debe ser reconocido como una dimensión más de tal información, como posición y

atributos. En cuanto a la definición y medida de los componentes de la calidad para bases de datos geoespaciales, Veregin (1.999) expone los siguientes: exactitud, precisión o resolución, consistencia y compleción. A continuación se explicarán brevemente cada una de ellas.

En el mismo orden de ideas, Gahegan y Ehlers (2000) exponen un análisis interesante en cuanto al modelaje de la **incertidumbre** en un Sistema de Información Geográfica (SIG) integrado. Específicamente se concentran en la fusión de actividades entre un SIG y Sensores Remotos (SR). Plantean que a medida que la información es procesada desde su forma cruda hasta representaciones mas elaboradas usadas por un SIG, ésta pasa por diferentes y numerosos modelos conceptuales de información a través de una serie de transformaciones, cada modelo y cada transformación contribuye con la **incertidumbre** total presente en la data. Primero describen varios modelos de espacios geográficos en términos de las características de incertidumbre presente inherente que aplican, esto es luego trabajado en un formalismo sencillo. Segundo, describen los diferentes procesos de transformación que son usados para formar objetos o clases geográficas a partir de imágenes digitales, y establecen sus efectos en las características de incertidumbre de la información. Y tercero, utilizando el formalismo para describir los procesos de transformación, generan un marco conceptual para la propagación de la incertidumbre a través del SIG integrado.

Los anteriores autores explican que al procesar data geográfica, en una integración SR-SIG, se pasa por diferentes modelos de espacio geográfico, estos son el modelo Campo (C), la Imagen (I), el Temático (T), y el Objeto (O) o característica (estos serán explicados mas adelante). Exponen que las **fuentes de error** generadas en cada etapa y la incertidumbre está restringida a las siguientes propiedades: valor (incluyendo errores de medición y etiquetado), espacio, tiempo, consistencia y compleción. Hablan sobre dos tipos distintivos de incertidumbre, la “**generación de error**” (introducción de error por uso incorrecto de procedimientos y data) y la “**propagación del error**” (acumulación de errores en los procesos) Veregin (1989) en Gahegan y Ehlers (2000). Por ejemplo, al pasar del **campo** (terreno, información

de superficie reflejada) a la **imagen** (captura de la imagen) se generan errores debido al sensor, condiciones de toma, relieve, georeferenciación, interpolación, etc. Al pasar de la **Imagen al Tema** (modelo Temático), esto es la clasificación de la imagen (supervisada o no), se cometen errores de **etiquetado (muestras de entrenamiento)** y esto puede magnificarse según el proceso (clasificación sencilla, clasificación multitemporal, clasificación utilizando información de apoyo, clasificación usando diferentes sensores). Al pasar del **modelo Temático al modelo Objeto**, es decir, a puntos, líneas y polígonos (mapa final), los mismos pueden propagar errores de apariencia (*shape error*), como zonas en las cuales los píxeles han sido erróneamente clasificados, errores posicionales, y errores de definición del objeto.

Enfocándonos un poco sobre la calidad de la información a procesar, Ariza y Pinilla (2000) exponen que las componentes tradicionales de la calidad del dato geográfico son en primer lugar **la posicional** y posteriormente **la temática**; en la actualidad se considera que el dato geográfico posee un mayor número de componentes, las cuales, sin embargo, presentan problemas como cierta ambigüedad, falta de métricas y métodos de medición. El dato geográfico es toda información que nos permite conocer lo que ocurre (qué) en una determinada posición del espacio (dónde) y en un tiempo (cuándo). Estas preguntas son básicas en el día a día de nuestra sociedad actual, por lo que la producción de datos, y de productos geográficos de valor añadido, es cada vez más común; por este motivo se necesitan mayores esfuerzos para obtener los beneficios sociales que se derivan de la normalización. En cuanto a la definición y medida de los componentes de la calidad para bases de datos geoespaciales, Veregin (1.999) expone los siguientes: exactitud, precisión o resolución, consistencia, compleción y Genealogía o Linaje.

Veamos algunos conceptos, la **Exactitud posicional** hace referencia a la proximidad entre las coordenadas dadas y las reales. La **Exactitud del atributo** es similar a la anterior pero referida al valor del atributo del elemento geográfico, existe mayor diversidad debido a que los atributos pueden ser categóricos o numéricos. La **Exactitud temporal** se refiere a la discrepancia entre el dato codificado en la Base de Datos Geográfica y una coordenada temporal del mismo que nos sea de interés, la

actualidad del dato es su exactitud temporal cuando la coordenada de interés es la fecha actual. La **Consistencia lógica** se refiere a la ausencia de contradicciones en la base de datos, a su validez interna. La **Compleción** quiere indicar la ausencia de errores de omisión en la base de datos. La presencia de todos los objetos del mundo real en nuestro modelo dependerá de la selección de temas y de reglas de generalización. La leyenda *debe estar* completa, sin elementos extraños, etc. La **Genealogía o Linaje** es el conocimiento de los procesos, fundamentalmente referido a las fuentes, procesos de captura, métodos de análisis, sistemas de referencia, parámetros de transformación de proyección, resolución de datos., etc.

En este trabajo es de nuestro interés la **Exactitud del atributo**, de tipo categórico. Específicamente, nos interesan las clases de usos y coberturas presentes en el área de estudio abarcadas en la subimagen satelital, específicamente en la línea de costa. Ya que como sabemos en la naturaleza o en la superficie terrestre, en general, no solamente encontramos clases de uso y coberturas puras, sin mezclas con otros, al contrario existen una serie de usos y coberturas que se encuentran mezclados con otros usos y coberturas o, también, que presentan límites difusos, no exactos o precisos. Lo que se busca es evaluar un método que nos permita generar mapas más representativos de la realidad del área de estudio.

En la actualidad existen notables esfuerzos que pretenden establecer normas o estándares sobre la calidad de las Bases de Datos Geográficas, y programas, como por ejemplo IDRISI® (Eastman, 1.997), han adoptado en parte este tipo de información en sus formatos. Todo lo anterior nos permite concluir que al manejar información geoespacial se debe tener en cuenta que existe una carga de incertidumbre o imprecisión, y que además de identificarla, se pueden utilizar técnicas que nos permitan representar tal realidad geográfica, para de ésta forma poder conocer la calidad de los productos generados. Más adelante, se propone aplicar algunas técnicas, como la Lógica Difusa, para la identificación y el manejo de tales condiciones.

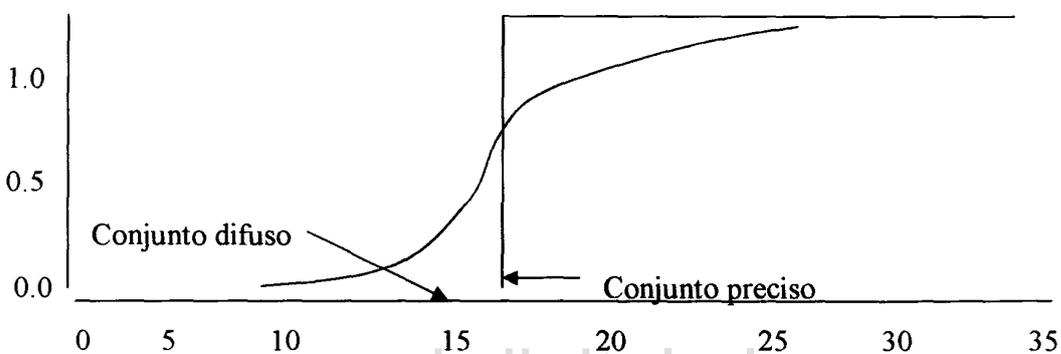
### **I.5.- Teoría de la Lógica Difusa y Conjuntos difusos**

La teoría de Lógica Difusa proporciona una base matemática rica para entender problemas de decisión y para construir reglas de decisión en combinación y evaluación de criterios. En la Evaluación Multicriterio, la membresía difusa es utilizada en la estandarización de los criterios. Existen diferentes funciones a utilizar en la solución de problemas de este tipo (como sigmoïdal, en forma de J, lineal, ver Eastman, 1997), qué función debe ser usada depende del entendimiento de la relación entre los criterios y el conjunto de decisión, y de la disponibilidad de información para inferir membresía difusa. En la mayoría de los casos las funciones sigmoïdal o lineal son suficientes.

Los conjuntos difusos son conjuntos (o clases) sin límites precisos, esto es, la transición entre ser miembro y no ser miembro de una “localidad” en el conjunto es gradual (Zadeh, 1.965; y Schumaker, 1982, en Eastman 1997). Un conjunto difuso se caracteriza por un grado difuso de membresía (también llamado posibilidad) que oscila entre 0.0 y 1.0, indicando un incremento continuo desde no membresía hasta completa membresía. Por ejemplo, al evaluar si una pendiente es fuerte o no, se puede definir una función difusa de membresía de manera tal que una pendiente de 10% tiene una membresía de 0, y una pendiente de 25% tiene una membresía de 1.0, entre 10% y 25% la membresía difusa se incrementa gradualmente en la escala desde 0 hasta 1 (ver figura I.7). Esto contrasta con los conjuntos precisos (“crispy sets”) clásicos que tienen límites distintivos, sin embargo, un conjunto preciso puede ser visto como un caso especial de conjunto difuso dónde la membresía cambia instantáneamente de cero o uno.

En cuanto al aporte de la Lógica Difusa (LD) en las clasificaciones de imágenes satelitales, ésta nos permite utilizar “clasificadores suaves”, los cuales generan clasificaciones más representativas de la realidad, esto permite reconocer la existencia de niveles de precisión y por lo tanto de errores asumidos. Describe propiedades que tienen una variación continua en sus valores, asociando partes de esos valores a una etiqueta semántica; gran parte del poder de la LD viene del hecho

de que esas partes pueden solaparse, este solapamiento corresponde a la transición de un estado al siguiente (ej: los límites borrosos en los espacios naturales, Ecotono). Estas transiciones provienen de la natural ambigüedad asociada que ocurre en los estados intermedios de las etiquetas semánticas (Cox, 1.994). La aplicación de la Lógica Difusa, la parte teórica de los números difusos y inclusión en el diseño del modelo de decisión bajo SIG y para la clasificación de imágenes satelitales, serán explicadas en el capítulo III de Metodología de Análisis de Sensibilidad Ambiental.



**Figura I.7. Funciones de membresía de Conjuntos Difusos vs de Conjuntos Precisos**

Con respecto al reconocimiento de la incertidumbre y el uso de la Lógica Difusa para manejar de forma más eficiente la data ambiental, se pueden citar los siguientes trabajos. Gopal y Woodcock (1.994) plantean que el uso de conjuntos difusos, en la evaluación de la exactitud de mapas, expande la cantidad de información que puede ser generada en relación a la naturaleza, frecuencia, magnitud y fuente de errores en un mapa temático. La necesidad de usar conjuntos difusos proviene de la observación de que no todas las locaciones de un mapa se ajustan sin ambigüedades a una simple categoría o clase, los conjuntos difusos permiten variar los niveles de membresía para categorías o clases múltiples. La generación de cuatro tablas resultantes del uso de funciones difusas, puestas juntas, proveen más información que las tradicionales matrices de confusión.

Edwards y Lowell (1.996); presentan un modelo basado en múltiples fotointerpretaciones para estimar y evaluar la incertidumbre local de bordes (o anchura difusa de bordes o límites), al producir mapas de parcelas forestales.

Desarrollaron un “estimador de anchuras difusas” al partir en dos el proceso perceptivo de fotointerpretación en dos componentes: discriminación y variabilidad. El estudio es útil para examinar el efecto del “contexto” en la imprecisión de bordes, y para sugerir cómo se puede evaluar la incertidumbre en los bordes existentes mediante algoritmos más automatizados. Zhang y Kirby (1997), evalúan tres diferentes enfoques que pueden ser aplicados para generar “mapas difusos” de coberturas de la tierra, obtenidos mediante fotogrametría a partir de fotos aéreas. Los tres enfoques son todos métodos de interpolación espacial, basados respectivamente en distancias, en modelos de redes irregulares trianguladas (TIN) y en indicadores Kriging. Encontraron que mientras el enfoque de modelo basado en TIN genera los mejores resultados empíricos en términos de la exactitud general de la clasificación (entropía y entropía cruzada), el indicador Kriging es el enfoque más exitoso para generar mapas difusos de cobertura a partir de información fotogramétrica.

Xing Zhu (1997), expone que existen dos tipos de incertidumbre asociada con la asignación de una entidad geográfica a una determinada clase en el proceso de clasificación. La primera está relacionada a la pertenencia difusa de la entidad al prescrito juego de clases, y la segunda está asociada a la desviación (error) de la entidad del prototipo de la clase a la cuál la entidad es asignada. Argumenta que tales tipos de incertidumbres pueden ser estimadas si se emplea un modelo de similaridad en la representación espacial de información. Bajo éste modelo de similaridad, la incertidumbre de la pertenencia difusa puede ser abordada por una medida de entropía de la distribución de membresía o por una medida de membresía residual. La incertidumbre asociada con la desviación del prototipo definido puede ser estimada utilizando una medida de exageración de la membresía. El estudio de caso, utilizando un mapa de suelos, mostró que valores altos de entropía ocurrían en áreas donde los suelos parecen ser transicionales, y que las áreas mal clasificadas tienen valores altos de entropía. La exageración de membresía fue alta para áreas en las que los expertos en suelos tenían poca confianza en la identificación del tipo de suelo, y en su distribución espacial. Tales medidas ayudaron a determinar que las áreas de mucha altitud fueron mapeadas con muy buena exactitud, y que se necesitan esfuerzos de reducción de errores al mapear el recurso suelo en áreas bajas.

Freissinet (1.997), expone una metodología para **evaluar la imprecisión** de resultados producidos a partir del modelaje en la estimación de la **vulnerabilidad de los recursos acuíferos**, frente a contaminación no puntual originada de actividades agrícolas, ésta metodología, basada en los subconjuntos difusos y la lógica difusa, puede ser utilizada para cuantificar las imprecisiones en los resultados obtenidos mediante modelos matemáticos, y para evaluar la confianza que se les puede asignar. Metternicht (1.999) exploró una metodología para calcular la cantidad de cambios que han ocurrido en un área usando tecnología de sensores remotos y modelaje difuso. Se concentró en la formulación de un procedimiento estándar mediante el cual usando el concepto de conjuntos difusos y la lógica difusa se puede definir la probabilidad de ocurrencia detectada a partir de imágenes sensadas remotamente. Adaptando la función de membresía del modelo difuso para ajustar la apariencia del histograma que caracteriza la imagen de cambio (generada por cualquier método de preclasificación de detección de cambios), se pueden identificar áreas de acuerdo a su probabilidad de sufrir cambios durante el periodo de observación.

Cheng y Molenaar (1.999) investigaron sobre el hecho de que algunos elementos a ser mapeados no tienen límites bien definidos, de geometría vaga y extensión imprecisa, y evaluaron las razones para la extensión difusa de tales elementos y sus imprecisiones al ser levantada la información de campo; se expone un ejemplo práctico en geomorfología de costas para exponer el enfoque. Urbanski (1.999), expone la utilización de SIG para la evaluación y mapeo de la **vulnerabilidad de aguas costeras** ante el florecimiento de algas (eutrofización), describe un método que incorpora el mapeo de probabilidades de los parámetros utilizados para describir aguas costeras y los **conjuntos difusos**. Debido a las condiciones cambiantes de los parámetros que caracterizan las aguas costeras, temperaturas, salinidad, cantidad de nutrientes o altura de las olas, afirma que es más adecuado representar **mapas de probabilidad de ocurrencia** de los atributos de tales parámetros, aplicando la teoría de los conjuntos difusos.

Stefanakis et al (1999) exponen que el uso de la **teoría de la lógica difusa** es útil para la representación y el análisis de la incertidumbre relacionada a los datos geográficos, por lo tanto, la incorporación de metodologías difusas en el almacenamiento de información en Sistemas de Manejo de Bases de Datos (SMBD) es beneficioso, a la vez que mejora su nivel de “inteligencia”. Trabajan dos aspectos: la representación y el análisis, específicamente, para lidiar con la incertidumbre de las entidades geográficas. Molenaar y Cheng (2.000) presentan un método para describir objetos sin límites fijos, esto es, objetos con extensión espacial difusa, y para extraer información de tales objetos a partir de imágenes digitales o de representaciones de campo en formato raster. Este método puede ser usado luego con fines de monitoreo cuando la extensión espacial difusa de los objetos es identificada en diferentes épocas, la dinámica de cambio de tales objetos puede ser conocida a partir de esas series de tiempo.

Woodcock y Gopal (2.000) proponen el uso de los conjuntos difusos y la teoría de la lógica difusa en la elaboración de mapas temáticos, ya que afirman que a diferencia de usar la teoría clásica de conjuntos, la cual asume que las categorías en los mapas son mutuamente excluyentes y exhaustivas, al usar la segunda permite mas flexibilidad en el tratamiento de las clases en los mapas en relación a la evaluación de la exactitud y la estimación de superficies, ésta permite evaluar la magnitud de los errores y la frecuencia de presencia de ambigüedad en las clases en los mapas. **Legleiter y Goodchild (2005)** exploran potenciales métodos alternativos al mapeo tradicional de hábitats en corrientes de agua, y presentan la teoría de la Lógica Difusa como un avance ante el esquema rígido booleano basado en objetos. Utilizan el modelaje hidrodinámico, datos de sensores remotos, y agrupamiento difuso para obtener clasificaciones que permiten una continuidad parcial de membresía y transiciones graduales entre tipos de hábitats.

**Fritz y See (2005)** plantean que el uso de diferentes categorías de leyenda crea un problema genérico asociado a mapas de cobertura de la tierra que abarcan la misma área geográfica, que puede haber discordancias en muchas áreas cuando se comparan mapas de cobertura de la Tierra productos de diferentes fuentes, aunque

las leyendas muestren las mismas o similares clases de cobertura de la Tierra. Proponen el uso del conocimiento experto y un esquema de lógica difusa, para capturar la incertidumbre asociada tanto a las diferencias en la leyenda y la dificultad en la clasificación cuando se comparan dos mapas de cobertura de la Tierra, y mapear la concordancia difusa. Aplican la metodología comparando el Mapa Global de Cobertura 2000 y el Mapa Global de Cobertura producido con MODIS. Afirman que este enfoque puede ser usado para mejorar la confianza general de un mapa de cobertura de la Tierra, ya que se pueden detectar las áreas de discordancia fuerte, y áreas que requieran más atención y posible remapeo.

**Hagen-Zaker et al (2005)** presentan la generación del Índice Kappa Difuso (K-Fuzzy), el cual permite comparaciones que consideren la difusividad (Fuzzyness) tanto de la ubicación como de la categoría y no requiere de más asunciones. En particular, la matriz de categorías similares puede ser aplicada para resaltar o no tomar en cuenta diferencias pertenecientes a categorías seleccionadas o grupos de categorías, y para distinguir entre diferencias debidas a errores de omisión o comisión, al asignar una respectiva categoría de uso, al calcular el índice Kappa.

En cuanto al uso de la Lógica Difusa en la clasificación de imágenes satelitales se pueden presentar los siguientes trabajos:

Foody (1.995) propone la entropía-cruzada para evaluar la exactitud de las clasificaciones difusas del uso de la tierra, a partir de imágenes satelitales; expone que es difícil evaluar la exactitud de tales clasificaciones, sin embargo, afirma que la exactitud de una clasificación puede ser determinada por la forma en que la probabilidad de la membresía de clase es dividida entre las clases y, esto puede ser expresado mediante medidas de entropía. La entropía-cruzada es calculada a partir de las distribuciones de membresía de clases, generada de conjuntos de datos tanto de las imágenes sensadas remotamente como de control de campo, ambos con propiedades difusas. Warner y Shank (1.997) estudian el potencial de las Redes Neuronales Artificiales para hacer clasificaciones difusas de imágenes satelitales. Específicamente, evalúan cómo la separación entre clases medianas, la matriz de

covarianza de cada clase, y la localización relativa de la clase mediana en el espacio espectral, limitan la representación difusa de mezclas (píxeles mixtos). Utilizan una clasificación difusa con una Red Neuronal de Propagación hacia atrás para ilustrar la influencia de tales factores.

Foody (1999) expone que una de las mayores limitantes de la exactitud, al hacer clasificaciones “duras” supervisadas de imágenes satelitales, de los mapas temáticos, está relacionada a aspectos conceptuales asociados con el uso de técnicas de clasificación como la herramienta para el mapeo. Se muestra que la clasificación “dura” convencional es menos apropiada que las clasificaciones difusas, y que puede ser definido un continuum de clasificación difusa. Ilustra el potencial de clasificación en cualquier punto a lo largo de éste continuum desde completamente preciso hasta completamente difuso, y que puede proveer un marco de acción para explotar más el potencial de las imágenes sensadas remotamente para el mapeo temático. Zhang y Kirby (1999) muestran cómo, utilizando fotos aéreas e imágenes de satélite, se pueden generar límites difusos de cobertura del uso de la tierra, usando los tres criterios: valores máximos de membresía difusa, índice de confusión y medida de entropía, con solo pequeñas diferencias, y que, el rebanado basado en los valores máximos de membresía difusa ofrece la solución más fácil y directa.

Por último, Gutiérrez y Jegat (2005) utilizan la lógica difusa en la clasificación supervisada de imágenes satelitales, hacen uso de la misma en la clasificación supervisada “suave” de una subimagen satelital para un sector de la Ciudad de Mérida, Venezuela, y sus alrededores. Al comparar la misma con una clasificación “dura” del mismo sector exponen que el resultado es más representativo de la realidad del sector, en cuanto a uso y cobertura de la Tierra, en éste caso para áreas urbanas, las cuales contienen una mezcla de usos que no permite ser representada adecuadamente mediante las clasificaciones tradicionales utilizando los algoritmos de clasificadores “duros”.

De la revisión de antecedentes desarrollada se puede resaltar que los diferentes autores han utilizado la Lógica Difusa para generar y evaluar mapas de uso

y cobertura de la Tierra más representativos de la realidad, cuando existen zonas de transición o gradaciones en los límites de diferentes usos y coberturas. Lo que en sí mismo es un avance en comparación con las clasificaciones duras generadas con los algoritmos respectivos. Igualmente, recordemos que “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” (Salazar, 1999).

Entonces, se propone un procedimiento metodológico para la construcción un índice que permita, de forma rápida y eficiente, evaluar la sensibilidad general de la línea de costa, aprovechando el conocimiento adquirido por expertos, que tomen en cuenta las características del medio analizado, los requisitos en la construcción de los indicadores e índices, y ejemplificado para área de estudio. Por lo tanto, se propone utilizar métodos de ponderación de fácil utilización, aunque sin perder la objetividad, fundamentación teórica, cuantificación deseada, y aprovechando el conocimiento acumulado de tales expertos.

**2da parte**

**Técnicas y Métodos**

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## **CAPÍTULO II**

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LA ACTIVIDAD PETROLERA**

#### **II.1.- Descripción del Área de estudio: la Cuenca del Lago de Maracaibo**

Al desarrollar un ASA es primordial hacer una descripción completa y exhaustiva del área en cuestión, se deben conocer tanto los aspectos físico-naturales como los socio-económicos, ya que parte del éxito en determinar las diferentes sensibilidades de los componentes a evaluar, es conocerles lo mejor posible. Entonces, parte del proceso metodológico implica hacer tal descripción, tanto mediante revisión bibliográfica, documentos existentes, mapas, planos, etc., como al aplicar técnicas que permitan mejorar tal conocimiento derivado de los libros o cualquier documento que aporte tal conocimiento. En adelante se expone la descripción del área de nuestro interés, así como de los componentes que la constituyen, al igual que una descripción de la actividad petrolera y las posibles consecuencias de un derrame.

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 (Ver figuras II.1 y II.2). A continuación se hace una descripción de la misma.

La Cuenca del Lago de Maracaibo, 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 (Ver figura No. II.1); 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. La gran masa de agua que ocupa la parte central de la cuenca está enmarcada por las llanuras casi sin relieve, parcialmente anegadizas, que se extienden hasta las

estribaciones de las serranías circundantes, donde afloran rocas de edad variable entre el Terciario Inferior y el Precámbrico.

### **II.1.1.- Descripción de la cuenca y el sistema del lago**

La siguiente descripción es tomada de ICLAM (1.991). No es lo mismo “el sistema del Lago de Maracaibo” que “el Lago” a secas, para comprender cómo funciona el lago, hay que enfocarlo como un sistema, con sus diversas componentes. Contrariamente a la concepción popular que designa *Lago* a todo el sistema, en su mayor parte éste ha de considerarse como un **estuario**, pues en él las aguas dulces que escurren provenientes de la hoya hidrográfica y las que caen en precipitaciones directas sobre el espejo de agua del lago, se encuentran con aguas salinas que penetran desde el Mar Caribe, lo cual viene siendo la definición de un estuario.

Sólo que éste encuentro no ocurre en una bahía, o en la desembocadura de un río o en un delta cenagoso, sino que involucra a un sistema mucho más extenso y complejo, que incluye todas las categorías de cuerpos de agua: Mar en el Golfo de Venezuela, Estuario clásico en la Bahía El Tablazo y Estrecho de Maracaibo, Lago en el “saco del Lago” o Lago de Maracaibo propiamente dicho y ríos tributarios, algunos de los cuales tienen características **estuarinas** en su desembocadura (caso del río Limón). Precisamente estas realidades, en términos de tamaño, características limnológicas y complejidad, son las que hacen del sistema del Lago de Maracaibo un caso único en el mundo.

El Lago de Maracaibo en si mismo tiene una 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.

### **II.1.2.- Ríos tributarios y cuenca hidrográfica del sistema Lago**

El 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  $2.017 \text{ m}^3/\text{s}$ , 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.

En resumen, al sistema constituido por el Lago-Estrecho-Bahía-Golfo drena una hoya hidrográfica de  $95.923 \text{ Km}^2$ . Si se añade el espejo de agua del Lago-Estrecho-Bahía ( $13.100 \text{ Km}^2$ ) se tiene un área de la cuenca hidrográfica de  $109.023 \text{ Km}^2$ . Y si se incluye el área estimada del Golfo hasta el paralelo de Castilletes ( $12.800 \text{ Km}^2$ ) se obtiene un gran total de  $121.823 \text{ Km}^2$ . De este gran total,  $16.426 \text{ Km}^2$  (un 13,48 %) se encuentran en territorio de la vecina República de Colombia (un 61,11 % de la subcuenca del Río Catatumbo, forma parte del Departamento Norte de Santander) y el resto (86,52 %) en territorio venezolano; incluyendo la totalidad del Estado Zulia y parte considerable de los estados Falcón, Mérida, Táchira y Trujillo.

La superficie terrestre en territorio venezolano ( $79.497 \text{ Km}^2$ ) representa el 8,67 % del territorio nacional. Definida así la cuenca, se encuentra entre los  $7^\circ 15'$  y los  $12^\circ 10'$  de latitud norte y los  $69^\circ 45'$  y  $72^\circ 45'$  de longitud oeste.





**Figura II.2. Subimagen satelital del Lago de Maracaibo**

### II.1.3.- Ecología del sistema del Lago

La gran heterogeneidad del sistema y de la cuenca hidrográfica del Lago de Maracaibo, origina áreas ecológicamente distintas, aunque interdependientes. En esencia se tiene, al igual que desde el punto de vista hidráulico: Golfo de Venezuela, Bahía del Tablazo, Estrecho de Maracaibo, Lago de Maracaibo propiamente dicho y ríos tributarios. En este trabajo se describe solamente lo pertinente al Lago de Maracaibo.

Peces de amplia distribución en el Lago son la curvina, bocachico (*Trochylodus sp.*), la mojarra, bagres, la lisa, el róbalo, el manamana (muy abundante en las aguas costaneras del sur del Lago) y sardinas. En realidad, estos son sólo los representantes de más amplia distribución de la extensa gama de especímenes piscícolas presentes en el lago propiamente dicho. El lago parece además ser zona de cría del carite (*Scomberomuros sp.*), pues siempre se les consigue allí como juveniles, es decir, en estado de inmadurez sexual; posiblemente en algún momento de su ciclo vital migran al Golfo de Venezuela. El armadillo (*Plecostomus watvata*) y la mojarra (*Eugerres plumieri*), según estudios de su gónadas, parecen asimismo desovar en el Lago. Entre los camarones predomina el camarón blanco (*Penaeus schmitti*) y el camarón marrón (principalmente *P. brasiliensis* y *P. duorarum*). También abunda el *Macrobrachium amazonicum*. Los cangrejos mas importantes por su amplia distribución son el cangrejo azul (*Callinectes sapidus*), *Callinectes bocourti* y *Callinectes maracaiboensis*.

El zooplancton está presente en el Lago en concentraciones promedio de todo el Lago de 160 org/L, con máximos que superan los 600 org/L, en la zona frente a la desembocadura del Río Motatán, y un mínimo inferior a 40 org/L en el centro del Lago, encima del hipolimnio salino. La región de mayor densidad parece ser la zona sur-occidental del Lago, entre los ríos Catatumbo y Escalante, así como frente al Río Motatán, generalmente con concentraciones entre los 240 y 250 org/L.

El fitoplancton se encuentra en altas concentraciones en todo el lago. Muestreos mensuales han revelado concentraciones promedio alrededor de 14.000

Capítulo II Descripción del área de estudio y la actividad petrolera  
cel/ml (a 1 m de profundidad). La zona nororiental es un poco más densa, principalmente la franja costera, donde ocurre una acumulación de algas como consecuencia de varios factores físicos, principalmente el sistema global de corrientes del Lago, los vientos locales y efectos de la marea. En general hay un predominio de las algas verde-azules (división *Cyanophyta*) en todo el lago, siendo *Anacystis* el género más común.

En la suma de factores favorables a las algas verde-azules, la interacción de petróleo crudo con el nitrógeno y el fósforo puede contribuir con un estímulo adicional que circunstancialmente refuerza su predominio. Experimentos realizados han demostrado que estas algas son resistentes a los efectos tóxicos o inhibitorios del petróleo crudo, mientras que el resto de la comunidad de algas no lo es, lo que les da una ventaja adicional en la competencia por los nutrientes, concluyéndose que las algas verde-azules, particularmente el género *Anacystis*, han evolucionado a través de un proceso de adaptación hacia cepas que toleran la presencia del petróleo y continúan su crecimiento si otros factores controladores lo favorecen.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

En la porción sur-occidental del Lago se ubica la ciénaga de Juan Manuel de Aguas Blancas y Aguas Negras, con una extensión de algo más de 1.500 Km<sup>2</sup>, la cual es refugio de especies en vías de extinción. Ha sido declarada por el MARN Reserva de Fauna Silvestre. El Chicaguire (*Chaunia cavaría*) y el Sangre de Toro Encendido (*Ramphocelus dimidiatus*) son dos especies de aves que no se encuentran en otro lugar del país. La gallineta pico verde (*Rallus nigricans*) tiene en la Laguna La Estrella, al sur de la Reserva, su única localidad conocida en el país. Especies en vías de extinción como el Manatí (*Trichetus manatus*) y el caimán de la costa (*Crocodylus acutus*) han sido observados en la reserva. Otras dos especies presentes en esta zona y que están amenazadas son la nutria (*Lutra longicaudis*) y el jaguar (*Pantera onca*).

**II.1.4.- Ecosistemas y componentes que describen la línea de costa en el área de estudio**

Una descripción de la cuenca estaría incompleta si no se incluyeran los datos existentes de clasificación de las costas. Esta clasificación abarca desde Sinamaica hasta la desembocadura del Río Maticora, 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 No. II. 1.

<b>Tipos de costa</b>	<b>Longitud (Kms)</b>	<b>%</b>
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
<b>Tipos de vegetación</b>	<b>Km</b>	<b>%</b>
Manglares	215.00	18.61
Otras embriofitas	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

**Cuadro II.1. Clasificación de las costas del sistema Lago de Maracaibo, tomada de ICLAM (1.991).**

Como se puede observar en el cuadro, en el ítem tipo de costa, existe un predominio de la costa tipo cenagosa, la cual sumada a la costa de tipo anegadiza

Capítulo II Descripción del área de estudio y la actividad petrolera 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. 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.

### **II.1.5.- Poblaciones presentes en la línea de costa**

Entre los centros poblados principales que se encuentran a lo largo de la costa del lago están: Maracaibo, Cabimas, Ciudad Ojeda, Lagunillas, Bachaquero, Palmarito, La Ceiba.

## **II.2.- Descripción de los tipos de costa presentes en el área de estudio**

### **II.2.1- Ecosistemas marinos costeros**

A continuación se hace una breve descripción de los ecosistemas marino-costeros. De acuerdo a Farnworth y Golley (1.977) los ecosistemas marinos costeros tropicales comprenden distintas variedades. **Las playas**, que se forman en los litorales donde el sustrato se desprende y transporta, están compuestas de sedimento, distribuido de acuerdo con el tamaño de las partículas que lo forman, por la acción mecánica de las olas, en consecuencia, el tamaño de las partículas varía en relación con la posición que ocupan en la playa. Este proceso actúa como fenómeno ambiental que determina la zonación de los organismos en la playa. Como unidad ecológica, ejemplifica ostensiblemente el más predecible y estereotípico de los sistemas. Las costas rocosas se caracterizan por el enérgico golpe de las olas, con una ancha zona de agua salpicada y otra ancha banda de agua finamente dispersada. El

Capítulo II Descripción del área de estudio y la actividad petrolera  
ecosistema de **arrecife coralino** es exclusivo de los trópicos, es uno de los sistemas tropicales más ampliamente productivos y diversos.

Son frecuentes los ecosistemas de **mangles** con concentraciones contiguas de lechos de *Thalassia* en regiones costeras bajas o en aquellas en que los arrecifes coralinos sirven de amortiguadores contra el embate de las olas. El medio en que los mangles crecen son ricos en nutrientes, y la fertilidad depende del volumen y calidad de la lama depositada. Debemos aclarar que nuestra área de estudio incluye algunos de los ecosistemas marinos costeros descritos anteriormente de forma breve. Es muy sui generis, ya que es un ecosistema-lago con salida al mar. A continuación se hace una descripción más detallada de los componentes presentes en nuestra área de estudio.

#### **II.2.1.1.- Descripción del ecosistema Mangle**

Es fácil deducir que el ecosistema Mangle reviste particular importancia en la composición forestal de líneas de costa en diferentes partes del mundo, principalmente en las regiones tropicales, y está incluido en el área de estudio, por lo tanto se considera adecuado hacer una descripción más detallada del mismo. La descripción que se hace a continuación es tomada de Guairiguata y Kattan (2.002).

El manglar, uno de los bosques más conocidos del trópico, puebla las zonas costeras y se caracteriza por su gran capacidad de crecer en sedimentos salobres. Los manglares son típicos de esteros, deltas y costas de baja energía mecánica y no se les encuentra donde el oleaje es fuerte. Como el rango de las mareas es más amplio en el Pacífico que en el Atlántico o en el Caribe, los manglares se extienden por varios kilómetros y desarrollan impresionantes bosques en los deltas de la costa pacífica neotropical. Las costas atlántica y caribeña, en cambio, tienen mareas de menor amplitud y estaciones secas menos pronunciadas; por lo tanto, allí los manglares se presentan en una faja costera mucho más angosta. En aquellos sitios donde la precipitación promedio anual es baja, se observa un marcado descenso en la altura del dosel de los manglares.

Los manglares del neotrópico se caracterizan por presentar ocho especies arbóreas distribuidas en cinco géneros y cuatro familias (una diversidad muy inferior a la de los manglares de Asia tropical). La especie mejor conocida es el mangle rojo, *Rhizophora mangle* (*Rhizophoraceae*), cuyas raíces aéreas forman una formidable barrera contra la acción del mar abierto. Cuando alcanzan el sustrato, las raíces del mangle se desarrollan profusamente, hasta un 50 % del volumen de las raíces es espacio vacío, lo que facilita su aireación en el sustrato, constituido muchas veces por lodo anaeróbico. Las especies *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Pelliciera rhizophorae*, *Conocarpus erecta* y *Laguncularia racemosa* se presentan, generalmente, en forma de fajas establecidas a lo largo de un gradiente de salinidad que se dirige tierra adentro desde el mar.

Se puede añadir que los manglares vivos, en pie, ofrecen aspecto característico, con su densa aglomeración de troncos altos, de los que nacen raíces accesorias que se hunden en tierra. Su productividad es elevada y forman una abundante biomasa, característica de los terrenos ricos en nutrientes y con abundante contenido de légamo arrastrado por las aguas. Varios estudios han puesto de relieve la importancia de los detritos de los mangles como sustento para la producción **estuárica**. La aportación que hacen los mangles a las aguas costeras pudiera muy bien ser esencial para el mantenimiento de la producción de peces e invertebrados. Aparte de su función en la producción de material para las pesquerías costeras, los manglares estabilizan el sedimento, protegen el contorno litoral, constituyen una fuente de combustible y proporcionan material de construcción y taninos, además de prestar otros múltiples servicios (Farnworth y Golley, 1.977).

A su vez FAO (2.001), en relación a los bosques del mundo, afirma que los manglares son ecosistemas muy productivos y tienen importancia para el desove, la cría y alimentación de muchos peces y crustáceos marinos. Las poblaciones locales utilizan la madera de los manglares como material de construcción y leña para fabricar carbón vegetal y trampas para los peces, y obtienen de ellos una variedad de productos forestales no madereros.

De acuerdo a Huber y Alarcón (1.988), en el país se encuentran manglares costeros y manglares ribereños. Los primeros son comunidades arbustivas o arbóreas bajas pero densas, con distribución irregular, son del tipo oligotrófico; las especies características son *Rhizophora mangle*, *Avicennia nitida*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erecta*, *Acrostichum aureum*. Los manglares ribereños (de aguas salobres), son comunidades arbóreas densas, de altura media a alta (hasta 15-20 m), ubicadas en desembocaduras y ensenadas con aguas salobres (Río Limón, Río Escalante). Son del tipo eutrófico. No se diferencian mayormente de los costeros en su composición florística, pero sí en su fisonomía y dominancia.

ICLAM (1.991) afirma que la importancia ecológica y utilidad del manglar puede resumirse de la siguiente manera: a) son áreas protegidas para el desove de peces y muchas otras especies; b) alrededor del 10% de la productividad del manglar es convertida en biomasa animal (peces, cangrejos, camarones, etc.) a través de la cadena trófica. Las dos terceras partes de la pesca a nivel mundial depende de los manglares de la costa; c) dan protección a numerosas especies en peligro de extinción (ej el Caimán de la costa); d) son capaces de reducir la erosión de la costa y ganarle terreno al mar; e) tiene usos en acuicultura; f) igualmente, usos comerciales tales como explotación de maderas pesadas muy resistentes al ataque de insectos, como es el mangle rojo.

Adicional a lo anterior, puede concluirse que los manglares tienen el valor de más alta sensibilidad, como se puede constatar en las escalas de sensibilidad ante derrames petroleros revisadas, y con manglares en las áreas objeto de estudio (Jensen et al (1.990) y Jensen et al (1.993). Igualmente, las áreas cenagosas en general son muy sensibles a los derrames petroleros, pues frecuentemente están asociadas a una vegetación que atrapa fácilmente y retiene el petróleo, de forma que impide la redistribución del mismo. Por esta razón y por la extensa gama de comunidades biológicas asociadas a este tipo de hábitat, los manglares y las áreas cenagosas están más expuestos a los daños potenciales de un derrame de petróleo.

### II.2.1.2.- Descripción del Bosque inundable

La descripción que se hace a continuación es tomada de Guairiguata y Kattan (2.002). En las tierras bajas muy húmedas, los bosques inundables de agua dulce se encuentran “detrás” (tierra a dentro) de los manglares, donde la salinidad no ejerce ninguna influencia sobre el sustrato, y a lo largo de grandes ríos con planicies de inundación. La frecuencia de las inundaciones, su profundidad y el período en que ocurren parecen ser factores importantes en la composición y dominancia de los bosques inundables. Siempre se observa menor riqueza de especies de árboles en las zonas inundables que en los sitios que se encuentran sobre suelos bien drenados.

Al igual que los manglares, algunos bosques inundables también forman rodales puros, de una o pocas especies. Dos especies arbóreas características de los bosques inundables *Mora oleifera* (*Caesalpinaceae*) y *Pterocarpus officinalis* (*Fbaceae*), también se presentan, ocasionalmente, dentro de los manglares. Muchos de los bosques inundables de las llanuras costeras y de las grandes cuencas hidrográficas, como por ejemplo la del Orinoco y del Amazonas, se encuentran dominados por varias especies de palmeras. Los bosques inundables más heterogéneos en cuanto a composición florística se encuentran más alejados del mar y a veces al borde mismo de los rodales puros antes mencionados. En muchos casos, las especies que dominan en estos rodales también se presentan en los bosques inundables pero en menor abundancia.

### II.2.1.3.- Características de los estuarios relacionadas con la contaminación

De acuerdo a Kiely (1.999) existen al menos cinco características importantes de los estuarios relacionadas no sólo con la polución propiamente dicha sino con el modo de distribución y la manera en la que afecta a los ecosistemas de estuario. Se tratarán aquí los siguientes puntos: régimen de marea, salinidad, fluctuaciones de la temperatura y el oxígeno, escasa diversidad de especies, sedimentos y sedimentación.

El régimen de marea afecta considerablemente a la distribución, carácter y adaptación de los organismos del estuario, y no sólo a estos, sino también al destino

y a los efectos de la contaminación. El ciclo diario de mareas implica que los organismos que viven en las capas superiores en la zona intermareal deben, por regla general, soportar la exposición prolongada al aire y cortos períodos de inundación de aguas salobres o salinas. Estas mareas también determinarán la distribución de los contaminantes de un estuario. Una visión superficial nos haría creer que en los estuarios existe una corriente unidireccional de agua que va del río al mar, por lo que tenemos la impresión de que todo lo que se pueda verter en un estuario será transportado hasta el mar, donde se diluirá en la inmensidad de los océanos. En este caso, se podría pensar que al llegar el cuerpo del derrame al estuario este sería rechazado en parte, y de acuerdo a la época del año, por tal fuerza expulsora del río hacia el lago.

La diversidad y distribución de los organismos constituye una consideración importante a la hora de evaluar los efectos de la contaminación en los ecosistemas del estuario. En condiciones normales, los estuarios cuentan con escasa diversidad de especies, aunque el porcentaje de biomasa sea mayor que el de otros sistemas acuáticos. La mayoría de las especies presentes pertenecen a las eurihalinas (que toleran importantes cambios de salinidad) y se encuentran en abundancia. El sustrato también influye en las especies presentes, en la medida en que la parte superior del estuario tiende a ser más turbia, mientras que la zona más cercana al mar tiende a ser más pedregosa. La sedimentación de los estuarios produce marismas extensas que contienen mucha materia orgánica, metales y pesticidas. Los principales contaminantes de los medios marinos y de los estuarios son residuos orgánicos, metales pesados, sustancias químicas orgánicas sintéticas, agua termal y petróleo.

#### **II.2.1.4.- Descripción de las Playas**

Según Strahler y Strahler (1.997) la línea de costa, donde el agua salada del océano se pone en contacto con el agua dulce y los minerales sólidos de los continentes, es una compleja zona ambiental de gran importancia para el Hombre. Los humanos han ocupado las zonas costeras por una gran cantidad de razones. En primer lugar, constituye una fuente de recursos tales como pescado y mariscos, así como las aves marinas que se encuentran en aguas poco profundas y estuarios. En

segundo lugar, la línea de costa es una base para los barcos pesqueros y para los que transportan gente y mercancías entre los continentes; en épocas de guerra, la línea de costa es una barrera peligrosa para ser defendida de las fuerzas invasoras que llegan por el mar. En tercer lugar, la zona costera constituye un área de recreo con sus playas, brisas marinas y oportunidades para la pesca deportiva, navegación y actividades de recreo.

Los sedimentos entran en la zona costera de la rompiente a partir de varias fuentes, pueden derivarse directamente de un acantilado o escarpe marino que está siendo activamente erosionado. Los sedimentos que penetran en el océano o en un lago por la desembocadura de un río es otra fuente. Las olas pueden arrastrar arena y grava y transportarla hacia tierra. Cualquiera sea el origen de los sedimentos, es modelado por la acción de las olas en un depósito denominado **playa**. Los sedimentos que componen las playas oscilan desde la arena fina hasta los guijarros de varios centímetros de diámetro. Dentro de un determinado sector de la playa, los sedimentos suelen estar bastante bien seleccionados dentro de un tamaño particular. De esta forma existen playas de fina arena, de arena gruesa, de grava o de guijarros. Como regla general, las playas compuestas de arena fina son extensas y tienen una suave pendiente, mientras las playas de arena gruesa o grava son más escarpadas. Las playas formadas por guijarros son muy abruptas y tiene una alta cresta. Las partículas de arcilla y limo no forman playas, pero son fácilmente transportadas en suspensión por las corrientes a lo largo de la línea de costa.

En relación a la sensibilidad de las playas arenosas ante un derrame petrolero, se puede afirmar que al contrario de los ecosistemas costeros anteriormente descritos, sin presencia de vegetación significativa, en este tipo de costa las actividades de limpieza pueden presentar una mayor facilidad. Por supuesto que asumiendo la ausencia de vegetación en la misma, y también dependiendo del tamaño de grano de la arena, ya que un tamaño de grano grande permitiría la penetración del petróleo y haría más difícil su remoción, aunque este último aspecto se escapa del nivel de detalle de este estudio. En función de lo anterior, se puede afirmar que las playas arenosas, siempre que estén lejos de áreas urbanas, son menos sensibles que los ecosistemas anteriormente descritos.

## II.2.2.- Descripción de la costa urbana

La línea de costa urbana se caracteriza por presentar elementos antrópicos, sean estos puertos, ciudades, pueblos, áreas recreativas, etc. El Lago de Maracaibo posee en su línea de costa una serie de centros poblados que fueron listados en el punto III.1.6. Los aspectos que entran en juego para definir el nivel de sensibilidad de una línea de costa urbana son principalmente, en nuestro caso, los estéticos y los de funcionalidad de las instalaciones y servicios que se encuentran en la misma, es decir, al haber un derrame petrolero éste puede afectar la línea de costa ensuciándola, no solamente el componente natural de la misma, sino también a los barcos, sean de trabajo o recreo, y a las instalaciones.

Otro factor a tomar en cuenta es el relacionado a la posibilidad de las labores de limpieza, precisamente por existir población, es probable que estas actividades sean más fáciles de implementar que en otros sectores de la costa, primero por la presión de la opinión pública, segundo por la existencia de autoridades, recursos y mano de obra en las cercanías.

Según el autor, y en cuanto a la sensibilidad de la línea de costa urbana, se puede tomar en cuenta el criterio de que a medida que un espacio geográfico presenta mayor intervención humana es menos sensible que un espacio con menor o ninguna intervención, un manglar por ejemplo; según éste planteamiento, en general, la línea de costa urbana sería menos sensible ante el derrame que las costas menos intervenidas. También pudiera pensarse, en relación a las costas de playa arenosa desiertas, que las costas urbanas pueden ser clasificadas como más sensibles debido a la presencia de población, lo anterior puede ser debido a la sensibilidad de la población al ver sus costas contaminadas con petróleo. Esto se verá confirmado o no a medida que se avanza en la obtención de los resultados de este estudio.

A continuación se hace una descripción de la actividad petrolera y los efectos al ser derramado el petróleo, sea que provenga de barcos que lo transportan o desde tuberías.

### **II.3.- El Petróleo**

Según Kiely (1.999) el crudo es una mezcla compleja de hidrocarburos que deben refinarse antes de poder ser utilizados de múltiples formas (lubricación, combustión, productos farmacéuticos, etc.). El petróleo es un producto natural que se obtiene de restos de plantas fosilizadas durante millones de años en un medio marino. Por ello, no es sorprendente que sus componentes sean fácilmente biodegradables tras la acción de las bacterias, aunque cada uno de ellos se degrade a ritmos diferentes; el alquitrán es uno de los que mas tardan.

El petróleo llega al mar procedente de varias fuentes. Cuando el petróleo se vierte en el mar, al ser ligero se extiende en la superficie como una masa flotante. Los componentes menos pesados, que a menudo son también los más tóxicos, se evaporan o disuelven en el agua, los inmiscibles se emulsionan o dispersan en el agua y los residuos más pesados forman bolas de alquitrán. La parte inmisible forma una emulsión que recuerda una capa de aceite sobre agua, recibe el nombre de “mousse de chocolate”, contiene un 75 % de agua y constituye un grave problema cuando alcanza las playas turísticas y causa la aparición de masas pardas pegajosas en la zona costera. Las bolas de alquitrán flotan y son comunes en las aguas oceánicas, en especial en torno a las rutas marítimas.

Si bien el petróleo en el mar siempre suscitó cierta preocupación, la opinión pública no se interesó por la contaminación en forma de petróleo y no se prestó particular atención por parte de los científicos hasta los primeros naufragios de petroleros que llevaban crudos. Éstos fueron los del Tampico Marú en 1.957 en Baja California, y el Torrey Canyon en 1.967 cerca de Cornuailles, Inglaterra. Éste último naufragó en marzo no lejos de Lands End, y las playas de Cornuailles se vieron inundadas por grandes cantidades de petróleo. Estas playas contaminadas eran también un atractivo turístico, por lo que las autoridades trataron por todos los medios de rehabilitarlas antes de que comenzara la temporada turística.

### **II.3.1.- La actividad petrolera costa afuera. Impactos ambientales potenciales**

De acuerdo a Banco Mundial (1.992) la actividad petrolera costa afuera incluye la exploración, desarrollo y explotación de los recursos de petróleo y gas, costa afuera. Las fases principales del desarrollo incluyen los estudios geofísicos iniciales de amplias regiones para identificar los objetivos de exploración, la perforación de pozos desde barcos o plataformas temporales para probar los objetivos interesantes, la perforación de pozos de desarrollo espaciados desde plataformas de producción fijas y la construcción de la infraestructura de transporte y procesamiento. Las unidades de producción pueden ser varios tipos de plataformas con pozos múltiples de producción y reinyección, tanques de almacenamiento, separadores y equipos de apoyo. Usualmente, se realiza el transporte a través del oleoducto y ocasionalmente, por barcaza o buque tanque, hasta las refinerías y/o instalaciones de procesamiento de gas que se encuentran en tierra.

En relación a los impactos de un derrame petrolero, Banco Mundial (1.992) presenta una tabla con los impactos potenciales, se presenta una lista abreviada de los mismos de acuerdo al interés de este estudio:

- Trastorno de los recursos culturales, comunidades bénticas, arrecifes de coral, barreras costaneras, humedales
- Degradación de las aguas costaneras y costa afuera a causa de las descargas efectuadas durante las operaciones rutinarias (por ejemplo: lodos de perforación, aguas sanitarias, aguas de producción y derrames)
- Degradación de la calidad del agua debido a las emisiones de operación (combustión, derrames)
- Mortandad y/o disminución de la reproducción de los organismos bénticos, comunidades de coral y otros organismos marítimos por ahogo (por levantamiento de los sedimentos del fondo, lodos y rípios de perforación)
- Mortandad y/o disminución de la flora y fauna marítima, aves acuáticas y marinas, por haberse bañado en los derrames petroleros.
- 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)

- Pérdida o reducción de las áreas de pesca y sitios turísticos
- Pérdida de las áreas de playa debido al oleoducto y las instalaciones de soporte (uso de la tierra, impacto de las actividades de limpieza de derrames, uso de dispersantes, tráfico, trastorno causado por las actividades de limpieza y contaminación del suelo)

Igualmente, Henry y Heinke (1.999) afirman que los derrames de petróleo pueden ser causa de mortalidad en las aves y de contaminación en las costas, con efectos biológicos graves en los organismos que habitan en las zonas de mareas y cerca de la costa, y en valiosas pesquerías de mariscos (Costa de Galicia en España, 2.002). También se ensucian embarcaciones, redes e instalaciones de bahías, lo cual requiere una limpieza costosa. El impacto del petróleo en el medio marino abierto es más difícil de evaluar, pero es probable que el derrame tenga cierto efecto en las pesquerías y, en general, en los organismos presentes en las aguas superficiales del océano.

Otro autor, Kiely (1.999), expone lo siguiente en relación al impacto ecológico de la contaminación del petróleo. Las aves embadumadas de petróleo son quizás la imagen que provoca mayor indignación de todas las que puedan ilustrar el impacto del petróleo en el medio marino. Estas aves moribundas, teñidas de negro son, a menudo, los animales que más atención reciben por parte de los medios de comunicación. Las aves marinas corren un gran peligro, ya que entran en contacto con el petróleo que flota en la superficie del mar. El daño está provocado más bien por los atributos físicos del petróleo y no por su toxicidad (su ingestión). El petróleo obstruye las plumas, sustituye el aire que normalmente queda retenido entre éstas y la piel, por lo que reduce la capacidad de las aves de mantener su temperatura corporal. Los pájaros pueden ahogarse si su plumaje se empapa de agua o por hipotermia.

Las instalaciones creadas por el hombre en la superficie del mar son las que más riesgo corren. En este grupo se incluyen las de acuicultura, a veces es posible trasladar las jaulas a otras zonas no afectadas, aunque cuando éstas ya contienen peces, se deben remolcar muy lentamente para evitar que se vean dañados. Uno de los problemas de la contaminación petrolera es que resulta difícil prevenirla, dado su

carácter impredecible, cuando sea posible se utilizan barreras flotantes para proteger las instalaciones.

En relación a los derrames petroleros en nuestra área de estudio, ICLAM (1.991) afirma lo siguiente: “mientras exista explotación de petróleo en la cuenca del Lago, el riesgo de los derrames existirá, la mayor parte de estos provienen de los 2000 km de tuberías y las decenas de estaciones de flujo existente en el lago mismo. Otro peligro que persistirá en relación con el petróleo en la conservación del sistema del Lago de Maracaibo, está en la posibilidad, no descartable aunque tenga mínima probabilidad de ocurrir, de un accidente masivo como el de Puerto Valdez.

### **II.3.2.- Planes contingentes para un derrame de petróleo**

Los derrames catastróficos de petróleo como resultado de un reventón, la rotura de un oleoducto o el choque de un tanquero o barcaza, causarían la liberación rápida de grandes cantidades de petróleo a las aguas costa afuera, amenazando los mamíferos marinos, aves marítimas y costaneras y el área de la costa. Los planes de contingencia para enfrentar el derrame deben incluir el almacenamiento de los equipos de respuesta, ejercicios de capacitación y preparación de modelos (con los datos locales de las mareas y el clima) para las diferentes situaciones que puedan presentarse a causa del derrame. Aparte de los impactos y la interrupción de las actividades de la costa a causa de un derrame mayor, existe la cuestión de compensación por los daños (pérdidas de ingresos de la pesca, los botes e infraestructuras costaneras manchados, pérdida de beneficios recreativos e ingresos del turismo, y el daño y pérdida de los recursos naturales).

A lo anterior se pueden incluir estudios de este tipo para todas las líneas de costa que estén expuestas a derrames petroleros, sea por rotura de oleoductos marinos o accidentes de tanqueros petroleros. Esto permitiría conocer los sectores más o menos sensibles, y de ésta forma diseñar los respectivos planes de contingencia, que incluyen ubicar las zonas donde almacenar los equipos necesarios, y planificar las actividades de atenuación de las consecuencias del derrame.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AMBIENTAL**

#### **III.1.- Modelaje tradicional utilizando Sistemas de Información Geográfica**

El ASA puede ser un elemento de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), que permite establecer el vínculo entre las características del medio y los posibles efectos del proyecto sobre dicho medio. Este análisis permite evaluar cuán susceptible puede ser el área, ecosistema o medio a manifestar cambios en su condición actual ante cualquier intervención del hombre. Estableciendo gradaciones espaciales y temporales de la susceptibilidad del ambiente frente a posibles intervenciones, de tal forma que cada variable caracterizada sea expresada en función de su mayor o menor capacidad de mantener un equilibrio en sus condiciones o funcionamiento.

El ASA puede derivar en un Índice de Sensibilidad Ambiental (ISA), el cual puede ser mapeado. El concepto original de mapeo del Índice de Sensibilidad Ambiental (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. 1.990). Haciendo algo de historia, el tanquero Exxon Valdéz colisionó un coral cerca de Valdéz, Alaska, el 24 de marzo de 1989, produciendo el derrame petrolero más grande en la historia de los EUA; el impacto de los 11,1 millones de galones de petróleo en los ecosistemas y la economía de la región se ha sentido muchos años después. Los derrames petroleros seguirán ocurriendo, quizás por errores humanos o negligencia.

Los científicos que trabajan con la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) y el Servicio de Guardacostas de los EUA, pensaron que debía existir un Sistema de Información Geográfica (SIG), para facilitar la limpieza de la línea de

costa de Alaska, instalado en esas rutas costeras de barcos tanqueros, para que pudiera ser interactivamente interrogado y utilizado, para asignar los limitados recursos en respuesta ante un derrame petrolero y de ésta forma minimizar los daños ambientales (Jensen et al. 1.990). Una vez hecha la revisión de literatura y de los antecedentes sobre la temática, se encontraron pocas aplicaciones al respecto, ya expuestas en el capítulo I, y ninguna aplicando las técnicas que en ésta investigación se proponen. En este trabajo se propone un Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental, ante un derrame petrolero, bajo el ambiente de un Sistema de Información Geográfica, utilizando Técnicas de Evaluación Multicriterio y Lógica Difusa, para la Cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Para introducir al lector se comenzará exponiendo la forma tradicional de modelar tales situaciones. Al diseñar modelos para evaluar en un determinado territorio la aptitud (potencialidad para determinado uso o actividad), el impacto (posibilidad de ser afectado negativamente), o en éste caso la sensibilidad (vulnerabilidad o fragilidad de determinado sector), el método tradicional utilizado en SIG es el despliegue de la información en forma de bases de datos gráficas (mapas) y descriptivas (datos asociados). Lo anterior se puede enmarcar dentro de modelos descriptivos. También se ha utilizado la superposición de coberturas con la ponderación de diferentes factores, que se considera juegan un papel en la determinación del objetivo planteado (estos son los modelos prescriptivos). Para hallar las áreas más aptas, más susceptibles o más sensibles, se superponen las coberturas de información que representan los factores o criterios que el investigador considera juegan un papel importante en tal evaluación, las superposiciones pueden ser con operaciones booleanas (de unión, intersección) o aritméticas (adición, multiplicación).

Por ejemplo, para determinar el potencial de un territorio para establecer una actividad industrial, podrían utilizarse los factores siguientes: cercanía a las fuentes de recursos necesarios, disponibilidad de mano de obra, disponibilidad de agua, distancia a vialidad, entre otros. En la superposición “booleana” se tienen dos opciones, la

**intersección (“AND”)**, en la cual se deben poseer o cumplir las cualidades de cada capa de información, esto es, en el caso de dos factores, debe cumplirse una “y” la otra condición (un sector determinado se excluye del resultado si no cumple con las dos condiciones), en este caso se genera una decisión “dura” o de “aversión al riesgo”. La otra opción es la **unión (“OR”)**, en este caso la selección de sitios adecuados se obtiene si se cumple una “o” la otra condición en cierta medida (un sector se incluye en el resultado si cumple al menos con una de las condiciones), ésta es una decisión más “suave”, de “toma de riesgo”.

Los conceptos aversión o toma de riesgo pueden entenderse de la siguiente manera. Si se quiere determinar la ubicación ideal para una industria, y se considera que la disponibilidad de agua y de mano de obra juegan un papel importante en tal ubicación, en la **intersección** se deben presentar las dos condiciones, de manera tal que no existe riesgo de equivocarse al seleccionar las áreas adecuadas para el emplazamiento industrial. En la **unión** se le pide al sistema que identifique los sectores en los que están presentes una o la otra condición, en esta situación existe el riesgo de que algunos sectores seleccionados no presenten algunas de las condiciones requeridas, sea disponibilidad de agua o de mano de obra, se incurre en la posibilidad de tomar una decisión errónea.

Otra forma de llegar al anterior objetivo es utilizando la Combinación Lineal Ponderada o CLP, (Weighted Linear Combination, WLC). Suponiendo que se quiere evaluar el posible impacto que genere la actividad industrial propuesta, y especificando que los factores que se consideran influyen en la determinación de ese posible impacto son: presencia de ecosistemas frágiles, pendientes fuertes, paisajes prístinos, entre otros, se pueden asignar pesos de importancia a cada factor, en este caso, un bajo peso en un factor (pendiente) puede ser compensado por un alto peso en otro factor (presencia de ecosistemas frágiles), lo que se conoce como Intercambio o Compensación (Trade-off). En el anterior enfoque ya se habla de pesos, y de intercambio o compensación entre los mismos, lo que permite tomar una decisión más equilibrada.

Una vez revisadas las aplicaciones encontradas de ASA, los métodos de ponderación encontrados en la literatura, e identificado el potencial de aplicación de la EMC y la Lógica Difusa en la temática que nos ocupa, en este estudio se presentan diferentes enfoques para modelar la sensibilidad de la línea de costa del área de estudio, algunos similares a los encontrados en la literatura revisada. Se consideró entonces pertinente presentar diferentes formas de evaluar la sensibilidad de la línea de costa, desde modelos sencillos hasta el finalmente propuesto, el más elaborado y sustentado. Tales modelos son comparados en relación a su facilidad de implementación, en su fundamentación teórica, y la posibilidad de trabajarlos bajo SIG.

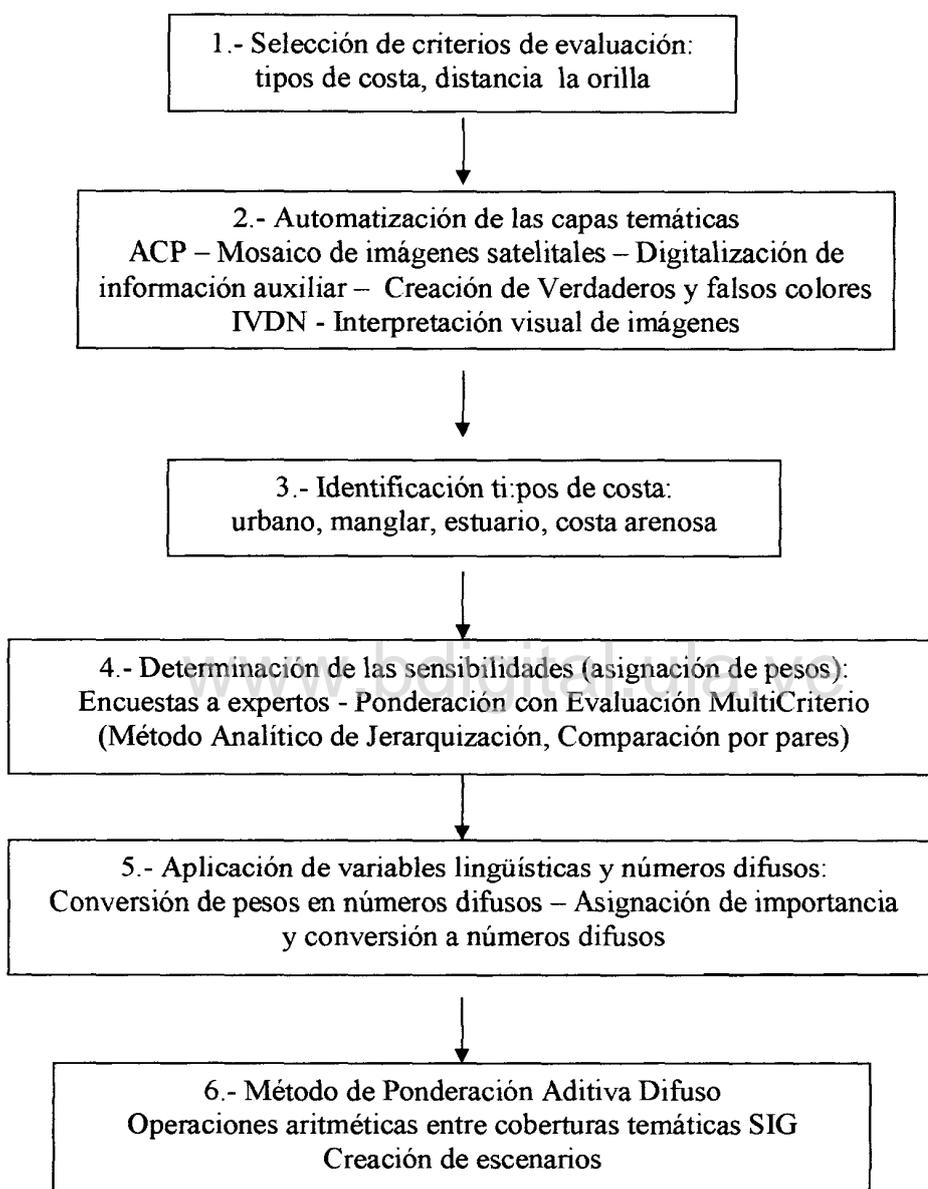
En este estudio se exploran diferentes modalidades en la determinación de las sensibilidades, todas bajo el ambiente SIG. Inicialmente se escoge solamente el criterio tipo de costa y se ordenan jerárquicamente (Ordenación por rangos) los diferentes tipos de costa. A continuación, al criterio tipo de 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 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 con el MAJ (EMC), se propone la aplicación del Método de Ponderación Aditiva Difuso (MPAD), mediante el uso de variables lingüísticas y números difusos. Al final se hace una evaluación y comparación de los resultados de los diferentes métodos.

La idea para el método finalmente propuesto, el MPAD, fue aprovechar las herramientas que facilita la EMC para generar los pesos correspondientes a las sensibilidades de los tipos de costa, lo anterior en vista de la complejidad que significa ponderar diferentes tipos de costa, en los que se incluyen elementos físico-naturales y socio-económicos, lo que puede entorpecer la creación de un índice único que considere ambos aspectos, en este caso la EMC permite combinar la opinión de diferentes expertos y así generar grados de sensibilidad que representen un consenso en la opinión.

Posteriormente, para mejorar el modelo, y reflejar que con ésta aplicación se pueden manejar cambios en el tiempo y en el espacio (puede haber cambios en los tipos de la línea de costa), así como en los actores (cambio en sus opiniones, en sus intereses) que participan en la asignación de los grados de sensibilidad, se hace uso del potencial de la Lógica Difusa, mediante el uso de Números Difusos, para generar escenarios, y de ésta manera lidiar con al anterior aspecto.

Por lo anteriormente expuesto, y con fines comparativos, se presentan los diferentes métodos, desde uno sencillo utilizando la ordenación simple, pasando por dos intermedios utilizando la ponderación de factores, y por último, se propone uno basado en variables lingüísticas y números difusos combinado con la EMC, que permite la creación de escenarios, de manera tal que se puede experimentar con diferentes puntos de vista o modificar la importancia asignada, que se reflejan en las diferentes ponderaciones o juegos de valores que permite manejar el modelo. Además, en el modelo propuesto se incluyen técnicas de procesamiento digital que el autor ya ha experimentado (Gutiérrez, 1.999), como el Análisis de Componentes Principales (ACP), que permite seleccionar las bandas del satélite más adecuadas para la creación del verdadero y falsos colores, así como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN), que facilita el reconocimiento, mediante interpretación visual de las imágenes, de ecosistemas característicos de la línea de costa, y que se consideró pertinente incluirlas para complementar el proceso metodológico. A continuación se expone la forma de generar, organizar y agregar la información necesaria para los diferentes modelos.

Es bueno resaltar que la teoría de lógica difusa es utilizada solamente en la aplicación de números difusos, no se utiliza formalmente la aritmética difusa en las operaciones desarrolladas. Obsérvese a continuación un diagrama de flujo del modelo finalmente propuesto, el MPAD:



**Figura III.1.- Diagrama de flujo de la metodología propuesta**

A continuación se describen cada una de los componentes de la metodología propuesta.

### **III.2.- Selección de los criterios de evaluación que integran el modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental (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 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”, y utilizado en tres de los modelos descritos, 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. (1.978) y Jensen et al. (1.990, 1.993 y 1.998), 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, 1.991; Hüber y Alarcón, 1.988); 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.

Tomando en cuenta los componentes ambientales que pueden ser afectados, en éste caso, y estando al tanto de las limitaciones de información y de escala, se escogieron los siguientes componentes: Agua, Suelo, Flora y Fauna, y Socio-económico. Tales componentes se encuentran incluidos en los tipos de costa identificados en el área

de estudio; entonces, para la línea de costa se definen cuatro condiciones, a saber: zonas con áreas urbanas, zonas de manglares u otro tipo de vegetación densa, ecosistemas estuarinos y playas arenosas.

De acuerdo al análisis visual, el procesamiento digital y con el apoyo de mapas se discriminaron los tipos de costa de la siguiente manera, donde se identificaban centros poblados de cierta magnitud en la línea de costa se denominaban costa urbana; a continuación se identificaron los segmentos de costa con presencia de ecosistemas de manglar (ciénagas o áreas anegadas y de vegetación densa inundable); posteriormente se identificaron los sectores con estuarios, con ayuda del mapa topográfico y la interpretación visual de las imágenes satelitales (para identificar bocas de ríos importantes); y por último, al resto de la línea de costa se le denominó playa arenosa. Se debe aclarar que el tipo de costa playa arenosa puede presentarse asociada a tierras agropecuarias y zonas urbanas de pocos habitantes.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

### **III.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), el cual será descrito a continuación.

Aquí es bueno aclarar que la selección del programa utilizado, tanto para el análisis visual y el procesamiento digital de las imágenes satelitales como para la manipulación de las capas temáticas, creadas para el modelaje con SIG, es el IDRISI®. Tal selección fue hecha por las siguientes razones: 1) la ventaja que posee tal programa al permitir las dos tareas, es decir, el procesamiento digital de las imágenes de percepción remota y el modelaje con SIG; 2) el conocimiento por parte del autor del manejo de tal programa; 3) el programa incluye diferentes módulos que permiten el procesamiento digital requerido (IVDN, ACP, EMC, Lógica Difusa, entre otros); y 4) la disponibilidad de la licencia requerida, facilitada por el tutor de esta tesis.

### **III.3.1.- Análisis de Componentes Principales para la selección de las bandas a utilizar**

Con el fin de seleccionar las bandas del satélite a utilizar en la creación de falsos colores, para resaltar los elementos de interés, como manglares, estuarios, áreas urbanas, etc., así como para la interpretación visual del mosaico o mapa-imagen, se utilizó la técnica del Análisis de Componentes Principales (ACP). Para los lectores que no están familiarizados en el procesamiento digital de imágenes de satélite, es bueno aclarar que un verdadero color se forma utilizando las bandas 1 (Azul), 2 (verde), y 3 (Rojo), en este caso del satélite LANDSAT-TM+, colocando la banda 1 en el cañón azul del monitor, la banda 2 en el cañón verde del monitor, y la banda 3 en el cañón rojo del monitor; los falsos colores se forman utilizando las anteriores bandas, y también las bandas 4, 5 y 7, en diferentes posiciones en los cañones del monitor.

El ACP se relaciona con el análisis de factores, y produce una transformación de un conjunto de bandas de la imagen, tal que, en el nuevo conjunto de bandas (los componentes generados) no están correlacionados unos con otros y son ordenados en términos de la cantidad de variación que ellos pueden explicar. Su objetivo es resumir un grupo amplio de variables en un conjunto más pequeño, sin perder una parte significativa de la información original, a su vez permite identificar las bandas con una

alta correlación.

Los componentes son abstracciones estadísticas de la variabilidad inherente en el conjunto original de bandas; por causa de su orden, los primeros componentes tienden a llevar la mayor parte de la información real del conjunto original de bandas de la imagen, mientras que los últimos componentes sólo describen las variaciones menores. Una aplicación de ACP es la compactación de datos, ya que al retener sólo los primeros componentes, se puede contar con mucha de la información, obviando los demás componentes.

Con el módulo PCA (Principal Component Analysis, en el programa IDRISI®) se realiza un ACP a partir de una serie de bandas y se genera una nueva serie de imágenes o componentes, que no están correlacionados entre sí, cada uno de los cuales explica, progresivamente, una porción menor de la varianza del conjunto de imágenes originales. Esta técnica se utiliza como fundamentación para los algoritmos de compresión de datos, ya que los dos o tres primeros componentes explican del 95 al 99% de la varianza en la serie original de imágenes (o bandas). En estos casos, los componentes que explican menos de un cierto porcentaje de la varianza pueden ser eliminados.

Para la aplicación de esta técnica se utilizaron las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 (denominadas Cuenca B1, Cuenca B2, y así sucesivamente) del LANDSAT-TM del año 2.001, y se le pidió al sistema que produjera 6 componentes; las estadísticas resultantes se presentan en los cuadros III.1 al III.4:

Al analizar las estadísticas de los cuadros se puede afirmar que:

- La más alta covarianza la tiene la banda 5 (CuencaB5: 3.504,77)
- Las bandas con menos correlación son la 4 y 1 = 0.634544, 5 y 1 = 0.637262, 4 y 2 = 0.724670, 5 y 2 = 0.724881, 4 y 3 = 0.731831 respectivamente.
- Los tres primeros componentes C1: 85.21 %; C2: 11,55 %; y C3: 2,37 %, cargan con el 99,46 % de la información presente en el juego de bandas originales.

- Además, se puede concluir que el componente 1 se parece más a la banda 2 (0,973245), esto lo podemos constatar observando el Componente 1 y la imagen banda 2, ver figura III.1, así como también que el Componente 2 se parece más la banda 5 (0,398988) y el componente 3 a la banda 4 (0,320961).

Cuadro III.1. Matriz de Varianza/Covarianza de las bandas

VAR/COVAR	CuencaB1	CuencaB2	CuencaB3	CuencaB4	CuencaB5	CuencaB7
CuencaB1	2174.38	2219.25	2457.00	1366.52	1759.20	1441.96
CuencaB2	2219.25	2355.12	2623.22	1624.18	2082.58	1636.17
CuencaB3	2457.00	2623.22	3009.61	1854.18	2531.85	1955.59
CuencaB4	1366.52	1624.18	1854.18	2132.92	2446.15	1552.35
CuencaB5	1759.20	2082.58	2531.85	2446.15	<b>3504.77</b>	2294.92
CuencaB7	1441.96	1636.17	1955.59	1552.35	2294.92	1639.28

Cuadro III.2. Matriz de Correlación entre bandas

Corr.Matrix	CuencaB1	CuencaB2	CuencaB3	CuencaB4	CuencaB5	CuencaB7
CuencaB1	1.00000	0.980688	0.960465	0.634544	0.637262	0.763759
CuencaB2	0.980688	1.00000	0.985311	0.724670	0.724881	0.832714
CuencaB3	0.960465	0.985311	1.00000	0.731831	0.779567	0.880431
CuencaB4	<b>0.634544</b>	<b>0.724670</b>	<b>0.731831</b>	1.00000	0.894677	0.830189
CuencaB5	<b>0.637262</b>	<b>0.724881</b>	0.779567	0.894677	1.00000	0.957439
CuencaB7	0.763759	0.832714	0.880431	0.830189	0.957439	1.00000

Cuadro III.3. Porcentaje de información contenida en cada componente

Componente	C1	C2	C3	C4	C5	C6
% deVar.	<b>85.21</b>	11.55	2.37	0.37	0.25	0.25

Cuadro III.4. Correlación entre componentes y bandas

Loading	Componente1	C2	C3	C4	C5	C6
CuencaB1	0.886116	-0.391768	-0.001375	-0.060955	0.094063	-0.007340
CuencaB2	<b>0.973245</b>	-0.370987	0.022509	-0.059142	-0.086777	-0.005017
CuencaB3	0.948068	-0.225167	0.018449	0.111480	0.001660	-0.010504
CuencaB4	0.866480	0.364222	<b>0.320961</b>	-0.011831	0.006996	0.035410
CuencaB5	0.914187	<b>0.398988</b>	-0.102854	-0.013488	0.000000	-0.058090
CuencaB7	0.941005	0.191994	-0.236758	0.000000	0.000000	0.114282

La anterior técnica permite 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.

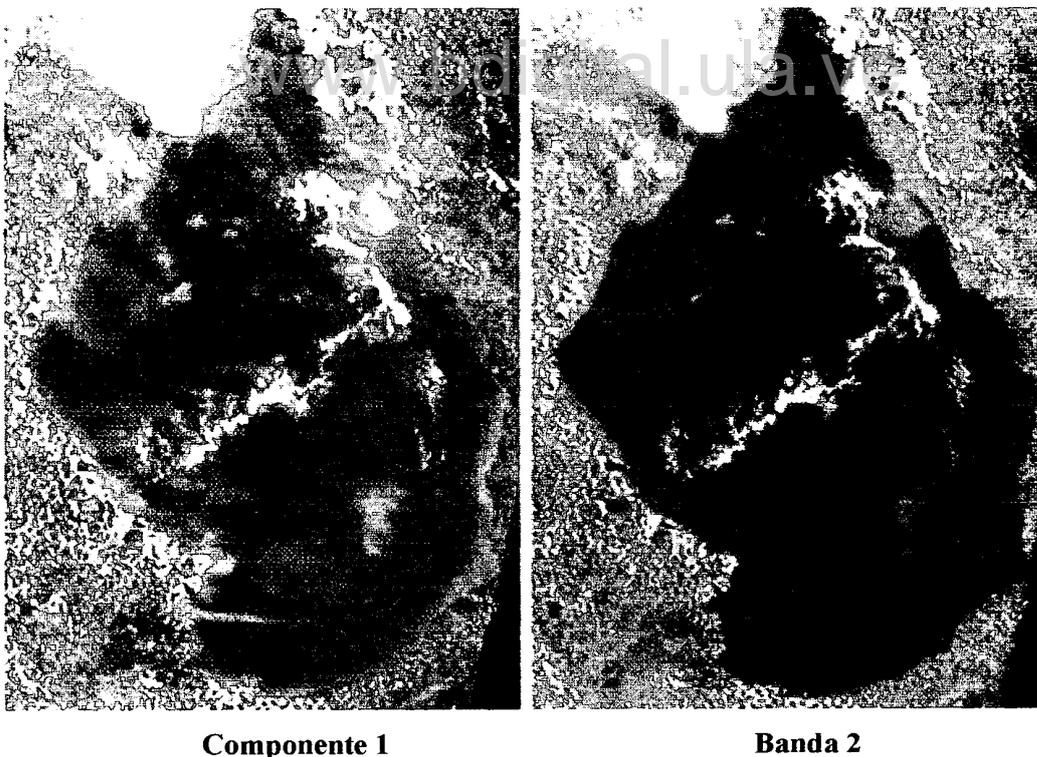


Figura III.2.- Componente 1 y Banda 2

### **III.3.2.- Creación del mosaico de imágenes satelitales, corte y georeferenciación de las subimágenes. Digitalización de información auxiliar.**

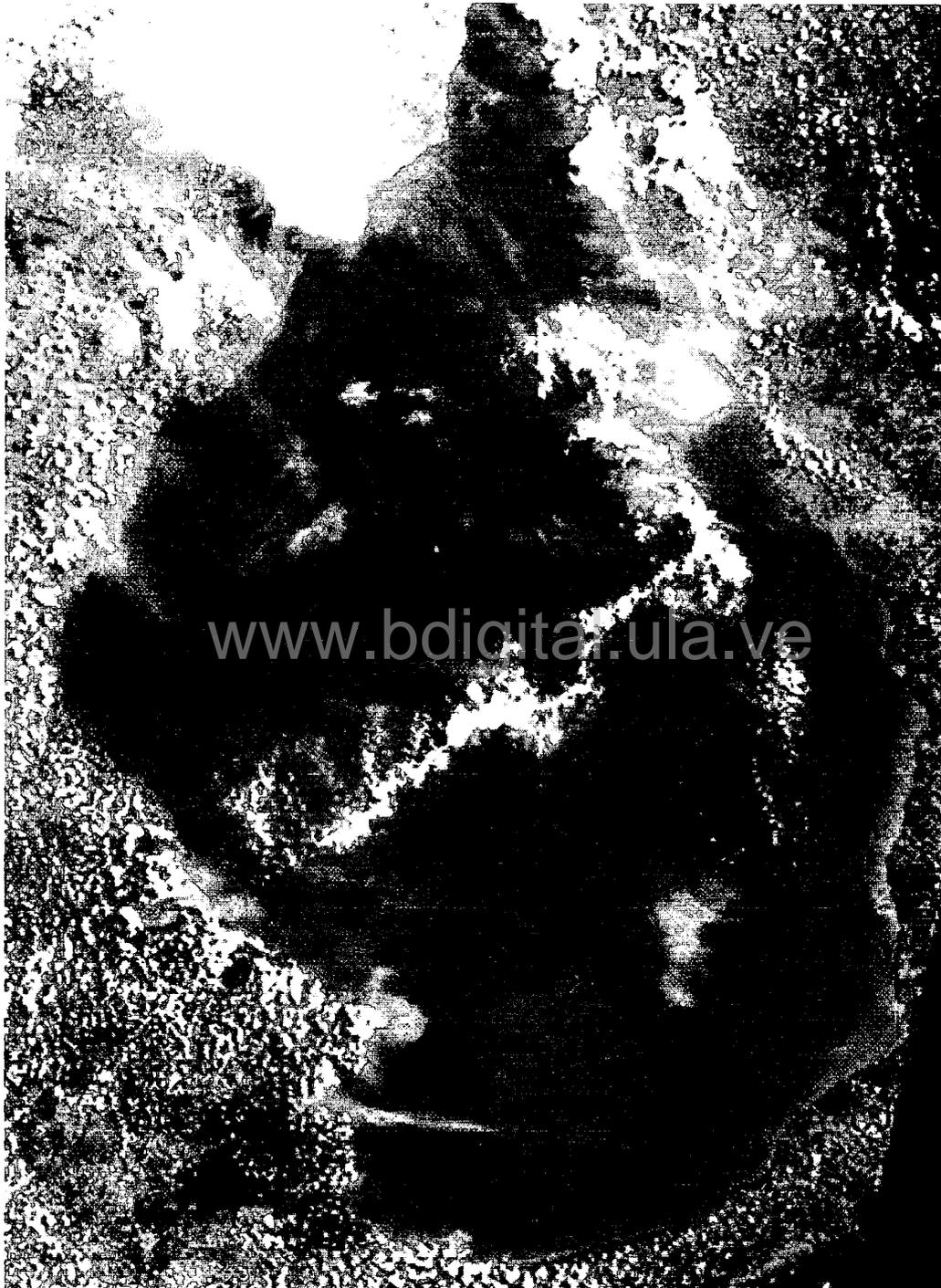
Para la creación (y posterior procesamiento, interpretación y análisis) del mapa-imagen del área de estudio se procedió de la siguiente forma. Se hizo uso de dos fuentes de imágenes de satélite LANDSAT – ETM +, la primera a partir de un mosaico ya existente, que se puede acceder en Internet (Imágenes MrSID), del cual se hizo un corte o ventana (subimagen) utilizando coordenadas geográficas. Se debe aclarar que esta subimagen 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; el producto se muestra en la figura No. III.2. La segunda fuente corresponde a imágenes satelitales, pasos del satélite Landsat 007-053 y 007-054, en formato Geotiff original y con todas sus bandas, a partir de las cuales se cortaron y unieron las subimágenes, ya que el área de estudio abarcaba parte de las dos imágenes originales (ver Figura III.3).

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. Figura III.4.

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 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, procesos y técnicas que serán explicados más adelante.



**Figura III.3. Mosaico de imagen LANDSAT-TM+ en falso color, formato MrSID**



**Figura III.4.** Mosaico en verdadero color a partir de imágenes, formato Geotiff

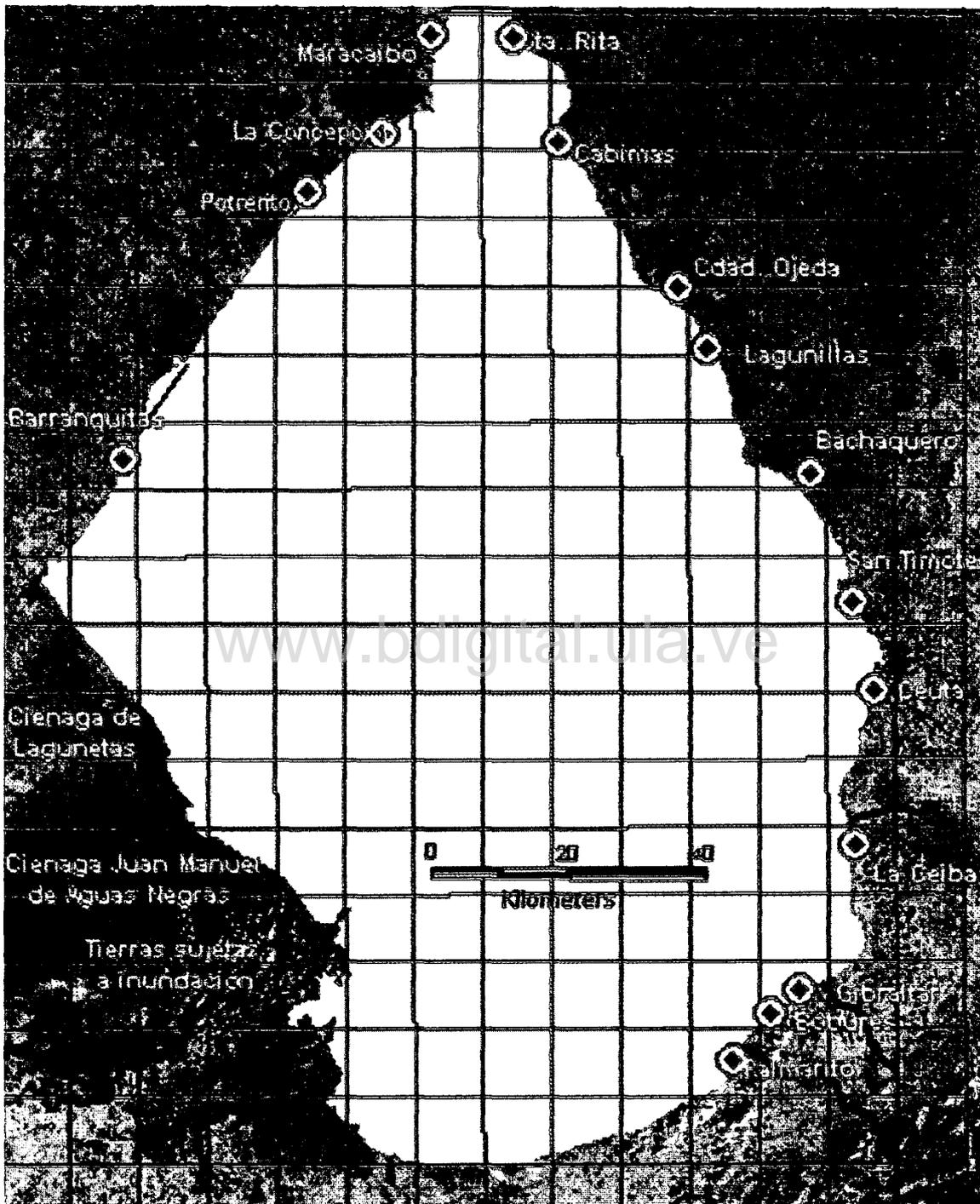


Figura III.5. Coberturas temáticas vector (centros poblados, hidrografía) superpuestas al mosaico del área de estudio.

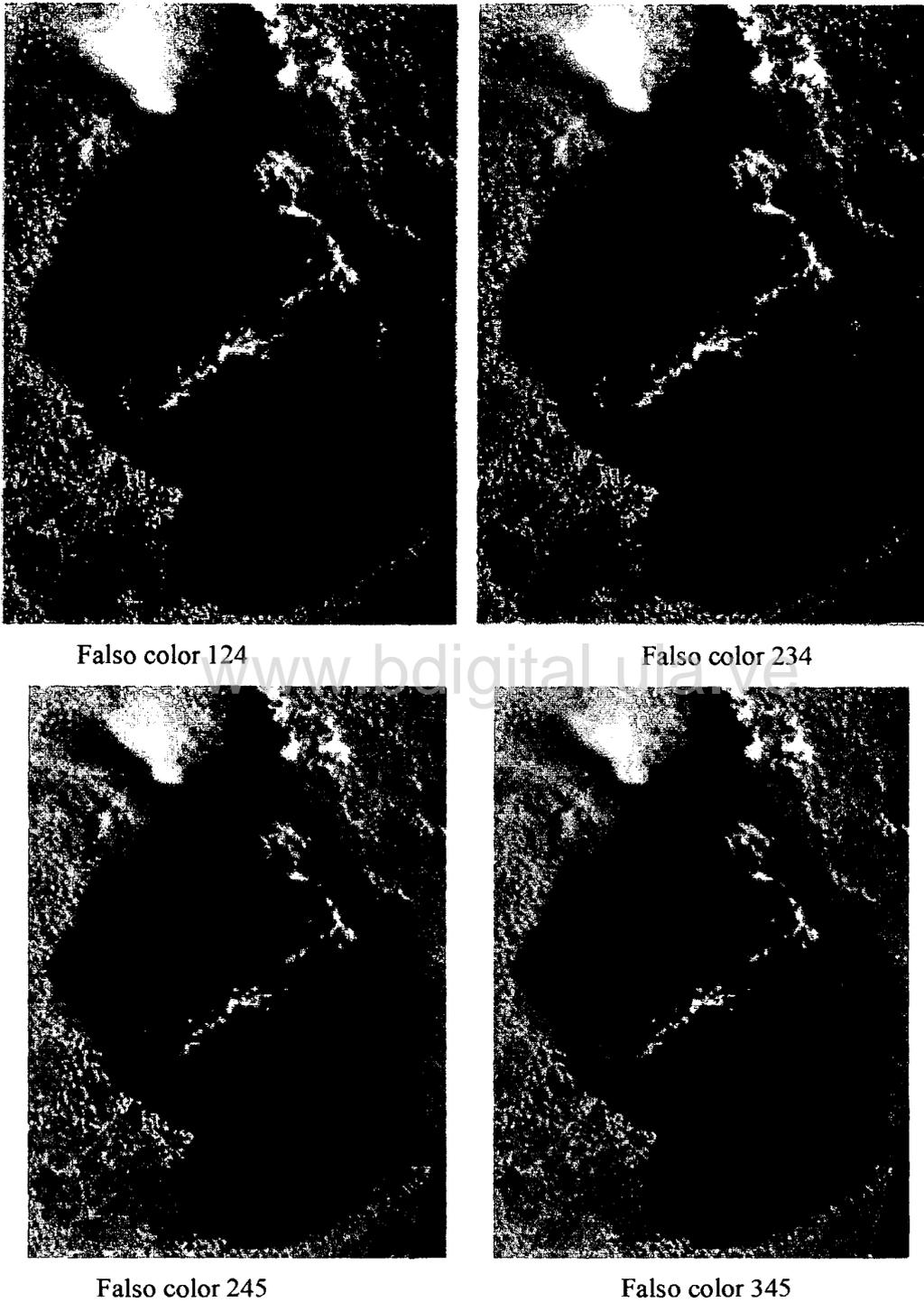
### III.3.3.- Generación del verdadero color y los falsos colores

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 (Figura III.5). Posteriormente, se hizo interpretación visual de las imágenes en verdadero y falsos colores para identificar preliminarmente los diferentes tipos de costa.

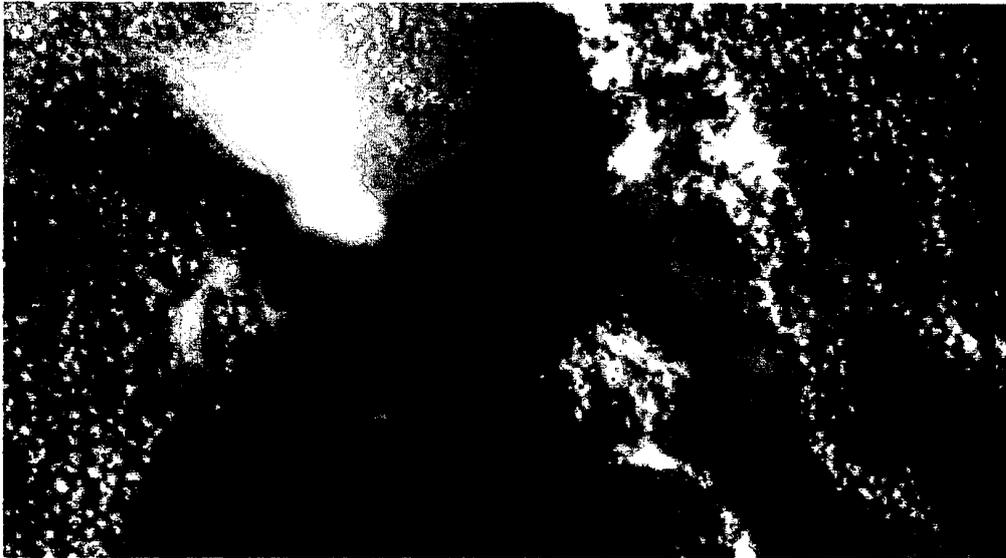
Al observar los falsos colores 124 y 234, en los cuales la vegetación aparece en color rojo, se puede deducir claramente que el primero no es muy adecuado para la identificación o discriminación entre los usos y coberturas presentes en la línea de costa, ya que en él se manifiesta poca diferenciación en los tonos de rojo presentes.

En el falso color 234 (Figura III.6.b) 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 (ver figura III.7).

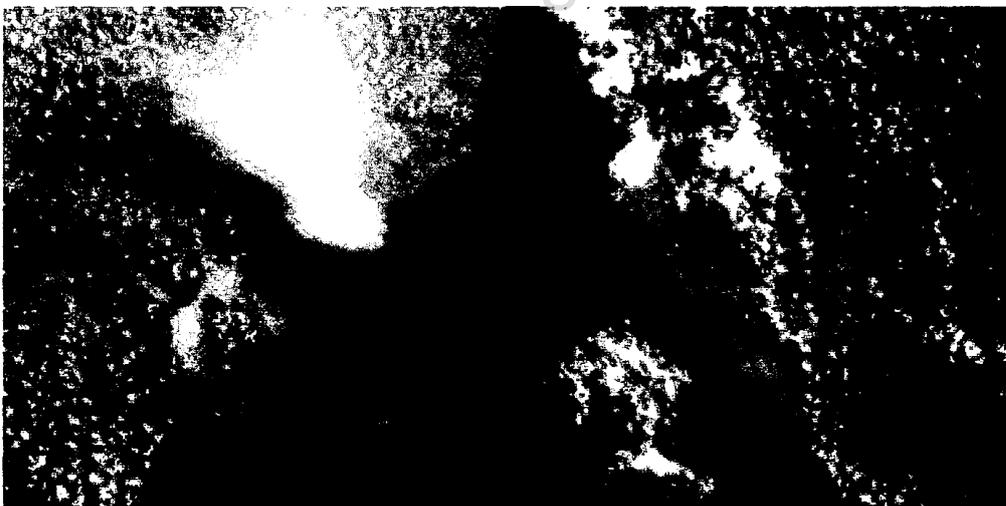


**Figura III.6.** Composiciones en falsos colores.



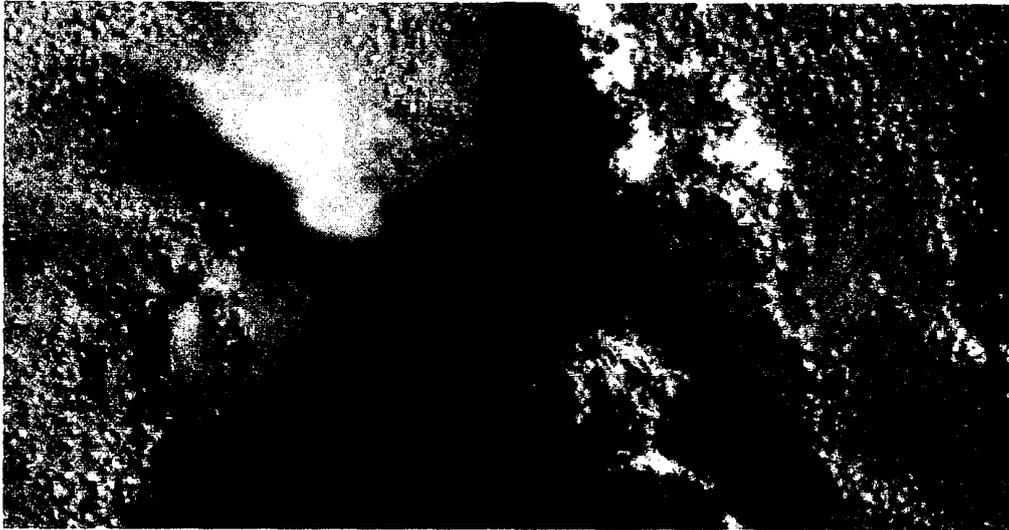
a. Falso color 124

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



b. Falso color 234

**Figura III.7.** Acercamientos para identificar áreas urbanas en falsos colores 124 y 234



a. Falso color 245



b. falso color 345

**Figura III.8.** Acercamientos para identificar áreas urbanas en falsos colores 245 y 345

Mediante la construcción de los falsos colores se pudieron identificar, preliminarmente, algunos de los respectivos tipos de costa de nuestro interés, como sectores con y sin vegetación (suelo desnudo) y sectores urbanos.

### III.3.4.- Aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN).

En vista de que las imágenes disponibles contenían un alto porcentaje de nubes, y la imposibilidad de adquisición de otras con fecha de adquisición diferente y próxima, no fue posible hacer un procesamiento digital exhaustivo y a partir de ellas generar el respectivo mapa de uso y cobertura. A pesar de ello, es válido, para los objetivos de nuestro estudio, seleccionar sectores en la línea de costa libres de nubes y aplicar las técnicas digitales propuestas, con el fin de resaltar las ventajas potenciales de su uso en grandes extensiones y en sectores con límites difusos. Entre tales técnicas están el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN) y la aplicación de Lógica Difusa en la clasificación supervisada de imágenes satelitales, ésta última será explicada más adelante.

Con respecto a los cocientes entre bandas, incluido el IVDN, Chuvieco (1.990) 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; su empleo se justifica en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación foto-sintéticamente activa, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

Continúa el mismo autor afirmando que 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.

Se combinaron entonces las bandas 3 (en el cañón Rojo) y 4 (en el cañón Infrarrojo), tal como lo aconsejan autores como Baret (1.991), Chuvieco (1.990), Hill (1.991) y Jensen (1.986), citados por Pujol y Pujadas (1995-96). 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.

Sumadas al IVDN se puede utilizar la banda 4, ya que responde bien a la vegetación y a la humedad, y puede ser usada también la banda 7 para distinguir grados de humedad, pastos secos de pastos húmedos, áreas inundadas de suelos secos y erosionados (Pujol y Pujadas, 1.996).

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 (Figura III.8), para reforzar la interpretación visual inicial hecha con los falsos colores. Con este índice puede apreciarse incluso la humedad presente en las nubes que cubrían el área para el momento de la toma de la imagen.

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, incluso puede apreciarse la pluma de sedimentos generada en la boca del Río Catatumbo, en azul intenso, ver figura III.9.

### **III.3.5.- Identificación de los tipos de costa**

De acuerdo a Hüber y Alarcón (1.988) 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 (1.991). Para localizar áreas urbanas y las diferentes zonas o condiciones (manglares, costas de playas arenosas, áreas de estuarios) se procedió de la forma siguiente.



**Figura III.9.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del área de estudio



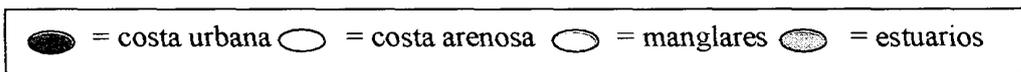
**Figura III.9.** Acercamiento en la imagen IVDN en zonas de manglares y bosques inundables.

Se delimitaron los polígonos (ver figura III.10) que identifican los diferentes tipos de línea de costa apoyados en: 1) el análisis visual de las imágenes satelitales (en verdadero y falsos colores, combinando las bandas seleccionadas); 2) el IVDN; 3) en los mapas topográficos a escala 1:100.000; y 4) en el de vegetación. Se debe aclarar que 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.

Es bueno aclarar que debido al detalle que se puede esperar en un estudio en esta escala de trabajo, el cual es una limitante, se encontraron sectores de línea de costa definida como un tipo y que incluyen características de otro, por ejemplo, en la costa arenosa, se encuentran centros poblados, tierras agropecuarias, o también, sectores de costa con manglar y pequeños ríos desembocando en el lago. Si se quiere, una técnica para tratar de solventar el problema anterior es la Teoría de la Lógica difusa, la cual nos

permite identificar tales sectores de transición o con porcentajes mixtos de coberturas, técnica que será explicada posteriormente.



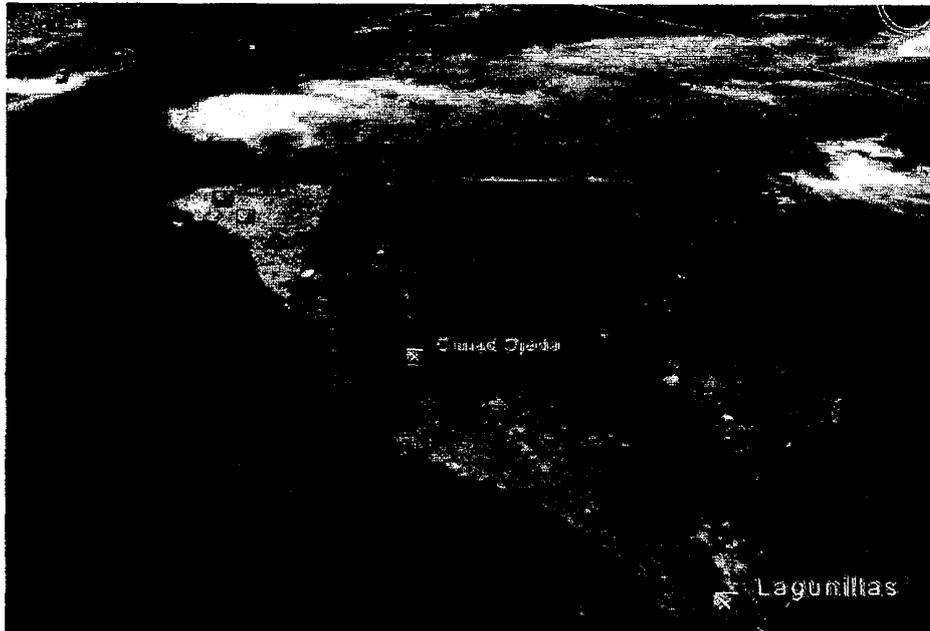
**Figura III.11.** Tipos de costa identificados (“buffers”) sobre imagen en falso color

A continuación se pueden visualizar ejemplos de los tipos de costa (Vistas tomadas de Google earth®). En relación a la costa de tipo urbano, en la figura III.11 se pueden observar los centros poblados de Maracaibo, San Francisco y La Concepción, al noroeste del lago. Otro ejemplo para costa urbana, en el noreste del lago, se puede observar la llamada costa oriental del Lago, cuyos centros urbanos representativos son Cabimas, Ciudad Ojeda, y Lagunillas, (Fig. III.12).

En la costa de tipo manglar al suroeste del lago, figura III.13, se puede observar la La Laguna Manatíes. Es bueno resaltar que el tipo de costa de Manglar se caracteriza por una vegetación densa, inundable, con entradas de agua que provienen del lago, lo que permite, en caso de un derrame, la penetración del petróleo.



**Figura III.12.** Vista de costa urbana: Maracaibo, San Francisco y La Concepción.



**Figura III.13.** Vista de Costa Urbana: Cabimas, Ciudad Ojeda, Lagunillas

Para resaltar las características de la costa estuarina se puede ver la figura III.14, en la que se pueden observar las desembocaduras de los ríos Catatumbo (parte superior de la imagen) y Escalante (parte inferior). Este tipo de costa se caracteriza además de presentar, en este sector, vegetación densa, un elemento que la diferencia de la costa de Manglar, y es la fuerza expulsora de la corriente del río que desemboca en el lago, lo que puede ser constatado en las figuras por las plumas de sedimentos presentes en el lago, lo que limitaría, de cierta forma, la penetración del petróleo costa adentro, al momento de un derrame.



**Figura III.14. Vista de costa de manglar: Laguna Manatíes**



**Figura III.15. Vista de costa estuarina: desembocaduras de los ríos Catatumbo y Escalante**

Para la costa arenosa se estableció el resto de la orilla que no presentaba las características de los anteriores tipos, este tipo de costa está asociada, en el área de estudio, a tierras agrícolas. Sectores representativos de este tipo de costa están en la costa occidental del lago, al sur de la costa urbana Maracaibo-La Concepción, en la costa oriental del lago, al sur de la conurbación Cabimas-Lagunillas-MeneGrande, y en la costa sur del lago. De éste último sector es el ejemplo que se presenta en la figura III.15, a lo largo de esta costa se encuentran los centros poblados Gibraltar, Bobures y Palmarito.



**Figura III.16.** Vista de costa de tipo arenosa

#### **III.4.- 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. Si tomamos en cuenta que 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; y, sabiendo que la

sensibilidad asignada a cada componente de la línea de costa es un aspecto de primordial importancia en los resultados a obtener, esto es, el mapa de sensibilidad final, se hace a continuación una exposición de cuatro métodos que pueden ser utilizados para tal fin. Los cuatro métodos son presentados con fines comparativos, la propuesta del método final, el más elaborado, se hizo en función de su facilidad de implementación, fundamentación teórica, y la posibilidad de ser utilizado en un ambiente de SIG.

### **III.5.- Modelo de Ordenación por rangos**

La forma más sencilla de definir las diferentes sensibilidades de la línea de costa se puede resumir de la siguiente manera. Primero, se identifican los diferentes tipos de costa, paso ya hecho, para posteriormente ordenarlos jerárquicamente, de esta forma fueron hechos los estudios de Mitchel et al. (1978) y Jensen et al. (1990, 1993, 1998). La jerarquización dependerá del conocimiento que se tenga del área de estudio por parte de los técnicos e investigadores que desarrollan el modelo, estará signada entonces por el conocimiento intrínseco de los componentes ambientales que caracterizan la línea de costa. Por ejemplo, Mitchel et al. (1978) se basó en tres casos de estudio evaluados y revisión de literatura, para formular una clasificación de vulnerabilidad de ambientes costeros ante derrames petroleros, su clasificación está basada principalmente en la longevidad física del petróleo (su permanencia en el sitio) en cada ambiente en ausencia de esfuerzos de limpieza.

De lo anterior se deduce que la jerarquización estará basada, para cada caso, en las características de la línea de costa de cada área de estudio. En este caso, habiendo identificado los tipos de costa presentes, y en base al conocimiento obtenido por el autor, se propone la siguiente jerarquización, en orden decreciente de sensibilidad, en primer lugar el manglar (este sería el más sensible), seguido del ecosistema estuarino, a continuación la costa urbana, y por último las playas arenosas.

- 1ro.- Manglar
- 2do.- Estuarios
- 3ro.- Urbano
- 4to.- Playas arenosas

Se debe aclarar que siempre se tendrá una carga alta de subjetividad al aplicar tal ordenación, subjetividad que puede ser disminuida a medida que se incluyan más opiniones para la jerarquización deseada. El resultado se puede presentar con las jerarquizaciones asignadas a cada tipo de costa o con una degradación de un color en el mapa.

#### **- Comentarios del resultado**

Lo anterior permite, de forma rápida y sencilla, presentar un panorama de los niveles de sensibilidades que se encontrarán los responsables de los programas de restauración y limpieza en caso de un derrame. Aunque adolece de presentar qué tanto es más sensible un tipo de costa en relación a otro. Una forma de mejorar o sustentar lo anterior, es definir una escala numérica que permita conocer qué tanto es más sensible un componente con respecto a otro, método que se verá a continuación.

#### **III.6.- Modelo de Adición utilizando dos criterios**

Una forma de mejorar o complementar el proceso de decisión, sobre las diferentes sensibilidades de la línea de costa, es identificar otros criterios que incidan sobre la sensibilidad de la misma, ya que se obtendrían sensibilidades finales que estarían controladas por más factores, como se encuentran en la realidad. De ésta forma el método puede pasar a ser multicriterio (2 criterios) uniobjetivo. Igualmente, se les asignan pesos a los criterios utilizados, tanto al tipo de costa como al criterio añadido y se hace una operación de suma mediante el SIG.

Se propone, en este caso, que la distancia a la orilla también puede jugar un papel primordial al evaluar la sensibilidad de la costa. En el caso de los manglares y las costas inundables puede afirmarse que así es, a medida que la distancia es menor a la línea de costa, la sensibilidad es definitivamente mayor, ya que no es lo mismo un derrame en una costa inundable que en una línea de costa definida por una playa arenosa o una costa urbana, en el manglar y los estuarios el petróleo pudiera penetrar más y como se sabe la resiliencia es menor. Además, las diferencias se acentúan ya que en una costa arenosa y/o urbana las actividades de limpieza se facilitan.

### **III.6.1.- Creación de un corredor (“Buffer”) de 100 m a partir de la línea de costa**

Se propone entonces la creación de un corredor a lo largo de la línea de costa. Este corredor define específicamente el área de estudio de nuestro interés, y se divide, para ésta investigación en dos secciones, una de 40 m a partir de la línea de costa (a partir de ahora puede denominarse “cerca” de la costa) y otra de 60 m a partir del límite anterior y tierra adentro (puede denominarse “lejos” de la costa). Los 100 m vienen dados por considerarse que, en el caso de zonas inundables, éste sería el margen de penetración del petróleo en los primeros estadios del derrame, y en el caso de playas con pendientes casi nulas, el mismo pudiera abarcar hasta ese límite.

Se asume que los tipos de costa seleccionados tienen sensibilidad diferente de acuerdo a si están “lejos” de la orilla, tierra dentro, o “cerca”, en las inmediaciones de la orilla. Se considera que serán más sensibles las porciones de territorio sobre la línea de costa, aunque también se puede asumir que existe diferencia en esa sensibilidad si se está en costa urbana o en un manglar. Es más probable que en el manglar el petróleo derramado penetre más ecosistema adentro, por sus características propias de ser terrenos inundados/inundables, entonces quizás es más adecuado extender ese límite de mayor sensibilidad, por ejemplo a 80 m, en el caso de manglar.

Se puede establecer un polígono a lo largo de la orilla de 100 m de ancho tierra adentro y a partir de la misma, ese polígono se divide en dos, uno externo (específicamente la orilla), que es “más sensible”, y uno interno (el alejado de la orilla), que es “menos sensible”, éstas variables lingüísticas pueden ser convertidas en números difusos, como será explicado más adelante. Igualmente, se puede acordar que se considera que el factor tipo de costa es “más importante” en la evaluación que el factor distancia a la orilla. Lo anterior también puede convertirse a números difusos, mediante ordenación de los pesos (importancia) asignados a los dos criterios, como se explica y propone en el cuarto modelo.

Obsérvese a continuación el procedimiento para el criterio “distancia a la orilla”. Si se acepta que en los ecosistemas de manglar o estuarinos existen condiciones ideales para el desove o procreación de algunas especies, y que el derrame acontece en las cercanías de un ecosistema de este tipo; a medida que nos alejamos de la costa tal ecosistema es menos vulnerable o sensible, y a la vez, reconociendo que la distancia establece un condicionante en los niveles de sensibilidad, ya que la vegetación en la línea de costa va reteniendo el petróleo derramado y protege el resto del ecosistema a medida que se pasa tierra adentro.

Para el caso de los tipos de costa, asumiendo una escala del 0 al 1, se asignan pesos diferentes a los mismos, por ejemplo, se le asigna 1 a los manglares, 0,8 a los estuarios, 0,6 a la costa urbana y 0,4 a las playas arenosas. Para el caso de distancia a la orilla, se propone lo siguiente, para las costas arenosas y urbanas el peso es igual en la línea de costa hasta 100 m tierra dentro, se les asigna entonces un peso de 0,5 a ambos (de 0 a 100 m tierra dentro); pero para las costas con manglares y estuarios, se considera que es diferente.

Si se establece una distancia de 40 m como límite, en el caso de manglares se propone que esos primeros 40 m tienen una sensibilidad de 0,8 y los siguientes 60 m una sensibilidad de 0,2; para el caso del estuario, los primeros 40 m tendrían una sensibilidad

de 0,6 y los siguientes 60 m una sensibilidad de 0,4. Lo anterior basado en que los estuarios, por su dinámica propia, pudieran “autoprotgerse” un poco más por la fuerza expulsora del río. Con los anteriores pesos se hacen operaciones de adición, generando los siguientes resultados. Puede observarse un esquema del modelo en la siguiente figura III.16.

Es bueno aclarar que la anterior asignación de pesos fue hecha sólo en base a la experiencia del autor, cada investigador puede tener, y de hecho es así, un criterio formado en cuanto a la sensibilidad intrínseca de un determinado tipo de ecosistema, puede decidir, según su experiencia, en qué punto poner un límite de distancia y asignarle una determinada sensibilidad, se debe entender que lo anterior se hace con fines explicativos del método, y por lo tanto, se admite que pueden existir otras opiniones que pueden cambiar los resultados. Recordemos que “el quinto grupo de operaciones o de Modelado Cartográfico incluye un conjunto amplio de operaciones en una secuencia lógica donde se integran varias capas de información, operaciones topológicas y temáticas, información externa y **juicios de valor** con la finalidad de buscar soluciones a problemas de carácter espacial (Barredo, 1996)”, y los juicios de valor pueden variar de un investigador o actor a otro, según su formación, intereses, etc.

#### **- Comentarios del resultado**

Se puede observar que la mayor sensibilidad resultó ser la del manglar en sus primeros 40 m (1,8), seguido de los estuarios en sus primeros 40 m (1,4), seguidos, en forma decreciente de sensibilidad, el manglar tierra dentro con igual peso que los estuarios tierra adentro (ambos con 1,2), los sectores urbanos tierra adentro y cerca de la orilla con los mismos pesos (1,1), hasta las menores sensibilidades (0,9) que corresponden a la playa arenosa en toda la extensión definida (100 m). Los puntajes resultantes pueden ser normalizados a una escala del 0 al 1, de manera tal de poder comparar con los resultados de los modelos siguientes.

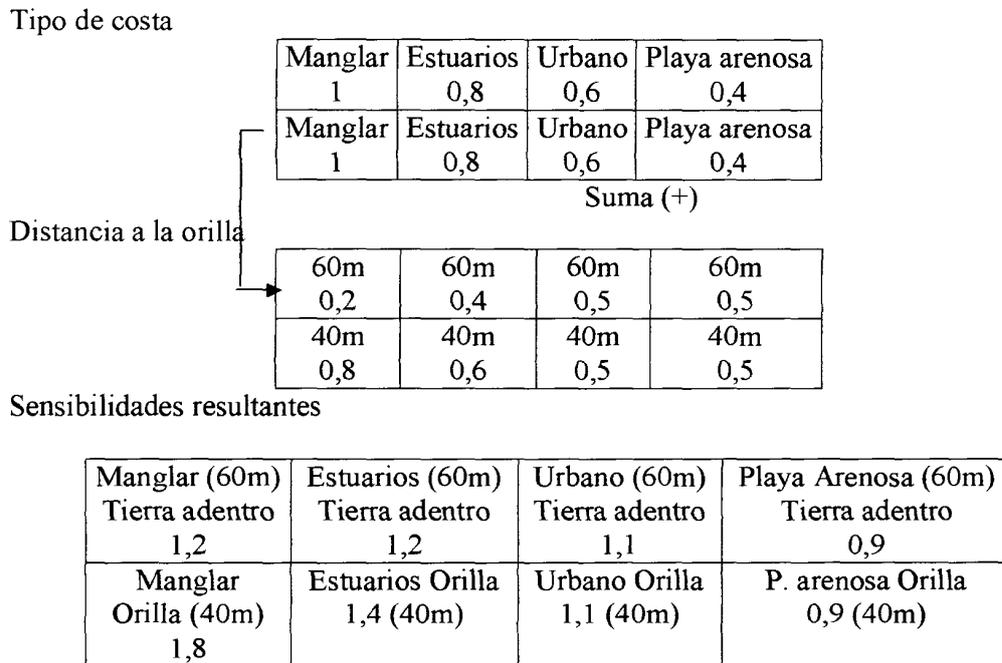


Figura III.17. Modelo de adición con dos criterios y pesos asignados

En relación al anterior modelo, se puede afirmar que se mejora el proceso de decisión, ya que al definir las sensibilidades se utiliza un mecanismo de cuantificación, algo “duro” por supuesto, y con su carga de subjetividad al asignar los pesos, pero esto es algo inevitable ya que son pesos asignados por la experiencia única del autor. Aunque en relación al anterior modelo, la ordenación, da una mejor idea de cuánto más sensible es cada sector del área de estudio. La asignación de pesos puede ser mejorada aplicando la EMC, mediante el método de las Jerarquías Analíticas (utilizando comparación por pares), solicitando la opinión de un panel de expertos, método que se expone a continuación.

### III.7.- Modelo de adición con dos criterios y aplicando Evaluación Multicriterio

Una vez expuestos los dos modelos anteriores, los que en si mismos son los más sencillos, y fueron elaborados con la sola experiencia del autor, en cuanto a la

asignación de niveles de sensibilidad, el primero, y los pesos asignados el segundo, se procede a continuación a proponer una mejora en la creación del modelo buscado de ASA para el área de estudio. A partir de éste punto se comienza a explotar la utilización de técnicas que fundamentan mejor la toma de decisión, en cuanto a disminuir el nivel de subjetividad implícito en los dos primeros modelos. Previamente, se exponen los trabajos teóricos revisados en relación al uso de la EMC en modelos de decisión utilizando SIG.

Eastman y Jong (1.996) en Mowrer et al. (1.996) plantean que el procedimiento Promedio Ordenado Ponderado (Ordered Weighted Average) utilizado en la Evaluación Multicriterio, el cual estandariza los factores utilizados, puede ser considerado perteneciente a una clase general de medidas difusas y más específicamente a los Conjuntos Difusos; ya que al estandarizar los factores éstos expresan una perspectiva de adecuación (a mayor puntaje más adecuado), sin embargo no hay un umbral que definitivamente ubique las asignaciones de forma precisa a cada una de las opciones involucradas (áreas a ser seleccionadas, áreas a ser excluidas). Entonces, cómo se resuelven esas incertidumbres en expresiones de decisiones con riesgo?, los autores afirman que pueden resolverse mediante el uso de medidas difusas.

Jiang e Eastman (2.000) presentan una revisión de dos enfoques de evaluación multicriterio (EMC) empleados en SIG, denominadas Booleana y Combinación Lineal Ponderada; discuten aspectos y problemas relacionados a ambas, proponen que para resolver las diferencias conceptuales entre ambos enfoques se apliquen medidas difusas, un concepto amplio que incluye la membresía de conjuntos difusos, y argumentan que los factores estandarizados/normalizados de la EMC pertenecen a una clase general de medidas difusas, a una instancia más específica de membresía de conjuntos difusos.

Como puede observarse, los anteriores autores proponen el uso de la Lógica Difusa para resolver algunos problemas de los que adolece la EMC. Como un primer paso, se propone el uso de la EMC para la generación de pesos en cuanto a las

sensibilidades de los tipos de costa del área de estudio. Más adelante, en el modelo finalmente propuesto, se propone el uso de la Lógica Difusa para mejorar el modelo bajo SIG y de ésta forma el proceso de decisión.

### **III.7.1.- Diseño, aplicación y análisis de la encuesta**

Una vez identificados los tipos de costa a ser evaluados, y seleccionado el método de ponderación, se procede a elaborar la encuesta. En este caso la encuesta, incluyendo la escala, se adaptó al ASA, por ejemplo, para el caso de la sensibilidad de un determinado ecosistema, los expertos deben tomar en cuenta, de acuerdo a su experiencia, los tres elementos para valorar la sensibilidad relativa de un ecosistema, propuestos por Coper y Zedler (1.980) en Canter (1.997), los cuales son la Importancia, la Rareza o Abundancia, y la Resiliencia o Recuperabilidad (para los casos de componentes frágiles, manglar y estuarios). Debido a que en el área de estudio existe un componente de tipo socioeconómico, es decir, la Costa urbana, los expertos deben también emitir opinión en aspectos de paisaje y sensibilidad ciudadana en cuanto a un derrame. Por último, se incluyó el tipo de costa playas arenosas, que se presenta con tierras agropecuarias asociadas, y al cual le deben asignar un peso, en comparación con los otros tipos de costa.

El panel de expertos estuvo integrado por profesores universitarios de diferentes profesiones (Ingenieros Forestales, Geógrafos, Ingenieros Agrónomos, Ingenieros Hidráulicos, Biólogos, Ingenieros Geólogos) y con diferentes especializaciones (Hidrólogos, Ecológicos, Botánicos, Pedólogos, etc.) que pertenecen a la Facultad de Ciencias, la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, y al Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), de la Universidad de Los Andes. Se considera que poseen una sólida gama de conocimientos, formación y criterios para generar opiniones consistentes y bien fundamentadas, para la ponderación de los componentes de la línea de costa en cuanto a su sensibilidad ante un derrame petrolero.

Se aclara que la encuesta se diseñó para conocer la opinión de los expertos en cuanto al criterio “tipo de costa”, la asignación de pesos para el criterio “distancia a la orilla” fue hecha por el autor, bajo argumentos explicados anteriormente. Se recuerda que para la selección de los integrantes del panel de expertos se incluyen tanto los conocedores del medio físico-natural como socio-económico, ya que en la evaluación que se les presenta, se incluyen aspectos de ambos tipos.

Esta escala se les presenta a los expertos (ver anexo 1), con el objeto de que ellos asignen los valores que consideren de acuerdo a su conocimiento del tema, es decir, deben definir qué tipo de costa es más sensible con respecto a cada uno de los demás y en qué medida, posteriormente se procesan éstas encuestas estadísticamente y se introducen los valores resultantes en el SIG para producir los pesos buscados.

Como recordatorio, se presenta a continuación la escala utilizada:

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremadamente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Igualmente	Moderadamente	Moderadamente	Fuertemente	Extremadamente
Menos Sensible				Más Sensible				

Se obtuvieron los siguientes resultados:

1.- Con respecto a la **Playa arenosa vs Manglares** las respuestas fueron las siguientes:

1/7, 1/7, 1/3, 1/9, 1/7, 1/5, 1/9, 1/7, 1/7, 1/7

Haciendo los cálculos respectivos, se obtiene un promedio de:

$(0.14 + 0.14 + 0.33 + 0.11 + 0.14 + 0.2 + 0.11 + 0.14 + 0.14 + 0.14)/10 = 0.16$ ; lo que se aproxima a 1/7, es decir, se considera la Playa arenosa **fuertemente menos sensible** que los Manglares.

2.- Con respecto a la **Playa arenosa vs Ecosistema estuarino**, las respuestas fueron las siguientes:

1/9, 1/7, 1/7, 1/7, 1/5, 1/5, 1/9, 1/3, 1/7, 1/5

Haciendo los cálculos respectivos, se obtiene un promedio de:

$(0,11 + 0,14 + 0,14 + 0,14 + 0,2 + 0,2 + 0,11 + 0,33 + 0,14 + 0,2) / 10 = 0,171$ ; lo que se aproxima a 1/5, es decir, se considera la Playa arenosa **moderadamente menos sensible** que un Ecosistema Estuarino.

3.- Con respecto a la **Playa arenosa vs Urbano**, las respuestas fueron las siguientes:

1/5, 1, 1, 1/5, 1/3, 1/5, 1/3, 1/7, 1/7, 1

Haciendo los cálculos respectivos, se obtiene un promedio de:

$(0,2 + 1 + 1 + 0,2 + 0,33 + 0,2 + 0,33 + 0,14 + 0,14 + 1) / 10 = 0,454$ ; lo que se aproxima a 1/3, Es decir, se considera a la Playa arenosa **moderadamente menos sensible** que la Costa Urbana.

4.- Con respecto al **Manglar vs Ecosistema Estuarino**, las respuestas fueron las siguientes: 3, 1, 5, 3, 3, 1, 5, 5, 1, 3

Haciendo los cálculos respectivos, se obtiene un promedio de:

$(3 + 1 + 5 + 3 + 3 + 1 + 5 + 5 + 1 + 3) / 10 = 3$  es igual a 3

Es decir, se considera al Manglar **moderadamente más sensible** que el Ec. Estuarino.

5.- Con respecto al **Manglar vs Urbano**, las respuestas fueron las siguientes:

9, 5, 3, 7, 3, 7, 7, 9, 9, 9

Haciendo los cálculos respectivos, se obtiene un promedio de:

$(9 + 5 + 3 + 7 + 3 + 7 + 7 + 9 + 9 + 9) / 10 = 6,8$ ; lo que se aproxima a 7

Es decir, se considera al Manglar **fuertemente más sensible** que la costa urbana.

6.- Con respecto al **Ecosistema estuarino vs Urbano**, las respuestas fueron las siguientes: 7, 5, 7, 7, 7, 7, 7, 9, 7, 7

Haciendo los cálculos respectivos, se obtiene un promedio de:

$$(7 + 5 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 9 + 7 + 7) / 10 = 7 \text{ es igual a } 7$$

Es decir, se considera al Ecosistema estuarino **fuertemente más sensible** que la costa urbana.

### III.7.2.- Cálculo de los pesos

Con los resultados de la opinión de los expertos, se procede a introducir tales ponderaciones al SIG, esto se hace mediante el módulo “WEIGHT” de IDRISI®. El anterior módulo se utiliza para establecer una serie de pesos relativos para un grupo de factores en una evaluación multicriterio. Los pesos se generan a partir de una serie de comparaciones por pares, con la que se mide la importancia relativa de los factores en la capacidad de acogida de los píxeles para la actividad que se evalúa, estas comparaciones por pares se analizan para producir una serie de pesos que suman 1, los factores y los pesos resultantes pueden utilizarse para producir una combinación lineal ponderada, utilizando el módulo MCE (también de IDRISI®) o ejecutando una operación de adición. Los valores propios de los pesos resultantes son:

Manglar:	0.5589
EcEstuario:	0.3072
Urbano:	0.0830
Arenosa:	0.0508

Resultando una Consistencia igual a 0,12 (alta). Como se explicó anteriormente en la revisión teórica, al obtener un resultado mayor a 0,10 se debe entonces reconsiderar la matriz.

Como se puede observar los pesos fueron calculados razonablemente, de acuerdo a lo previsible (mayor peso a los ecosistemas frágiles, menores pesos a la playa y a lo urbano), pero el Índice de Consistencia resultó en 0.12, por lo tanto se debe reevaluar la matriz. De acuerdo a las encuestas a expertos se produjo una determinada matriz de pesos, aunque resultó con poca consistencia (mayor que 0.10, debido a valores extremos al ponderar). A continuación se procede a hacer las respectivas modificaciones, mediante procedimiento (extraído de la Ayuda del programa IDRISI®, Eastman, 1.997) para solventar éste problema, el cual se expone más adelante.

De acuerdo a Eastman (1997) la matriz muestra los cambios que deberían experimentar los valores de relación (matriz de comparación por pares) para conseguir una consistencia perfecta con los pesos del mejor ajuste conseguido, si el Coeficiente de Consistencia global es mayor que 0,10 se debe examinar esta matriz para ver la comparación por pares con mayor desviación, éste será el valor de relación menos consistente. Se debe recordar que la matriz puede compararse de varias maneras cualquier par, así, además de la relación directa entre las variables A y B, la comparación entre estas variables podría realizarse a partir de las de entre A y C y entre C y B, de este modo puede evaluarse la consistencia de los valores de relación.

La desviación registrada por el valor menos consistente indica el cambio necesario para que este valor sea consistente con los pesos de mejor ajuste, si, por ejemplo, indicaba un -2, habría que reducir en dos puntos el valor de relación, esto equivale, por ejemplo, a disminuir el valor desde 5 a 3, o igualmente, desde  $1/3$  a  $1/5$ . Las desviaciones registradas son posiciones a lo largo de la escala, pueden existir posiciones fraccionarias, así, si la desviación era +1.8, y el peso original era  $1/5$ , indica que el nuevo valor debería ser  $1/3$ , ó 1.8 puntos por encima en la escala, Eastman (1997).

En este caso la matriz de consistencia resultó de la siguiente forma:

	Manglar	PArenosa	EcEstuario	Urbano
Manglar :	0.00	----	----	----
PArenosa :	-2.00	0.00	----	----
EcEstuario :	1.18	1.05	0.00	----
Urbano :	0.27	-1.37	3.30	0.00

En la comparación Manglar con PArenosa resultó una desviación de (- 2), entonces se cambia la matriz de comparación por pares de 1/7 a 1/9. En la comparación EcEstuarino con Urbano resultó la desviación (+ 3.30), igualmente se cambia la matriz de comparación por pares de 1/7 a 1/5. Se reescribe el archivo “Sensibilidad.pcf” con los anteriores valores, o se hace directamente desde la ventana de diálogo “Weight-AHP derivation”, y se recalculan los pesos. Resultando los siguientes:

Manglar: 0.5889,  
 Estuario: 0.2754,  
 Urbano: 0.0884, y  
 PArenosa: 0.0472.

Con una Consistencia = 0.07, lo que se considera aceptable.

### III.7.3.- Operación de adición

Una vez generados los pesos, se asignan los mismos al factor “distancia a la orilla” (pueden ser utilizados los mismos que se utilizaron el modelo de adición utilizando dos criterios), aunque deben ser transformados a la escala del 0 al 1. Posteriormente se hace una operación de adición para determinar las sensibilidades definitivas (Figura III.17). Los pesos resultantes también serán utilizados para la determinación de las sensibilidades mediante el Método de Ponderación Aditiva Difusa (MPAD).

**III.7.4.-Análisis y comentarios de los resultados**

Como puede observarse la mayor sensibilidad resultó ser la del manglar en la orilla (1,3889), seguida de los estuarios en la orilla (0,8754), posteriormente, y en orden de menor sensibilidad están el manglar tierra adentro (0,7889), estuarios tierra adentro (0,6754), las áreas urbanas en la orilla y tierra dentro resultaron con pesos similares (0,5884), al igual que las áreas con playa arenosa tierra dentro y en la orilla (0,5472). La ventaja del modelo descrito consisten en que los pesos calculados para el tipo de costa, al cual se aplicó la EMC, están generados mediante el método de comparación con pares que incluye un índice de consistencia, lo que permite equilibrar las opiniones de los expertos tomando en cuenta la variabilidad de sus experiencias y experticias, y además conciliar las opiniones extremas para darle consistencia a los cálculos.

Tipo de costa

Manglar	Estuarios	Urbano	Playa arenosa
0,5889	0,2754	0,0884	0,0472
Manglar	Estuarios	Urbano	Playa arenosa
0,5889	0,2754	0,0884	0,0472

Suma (+)

Distancia a la orilla

60m	60m	60m	60m
0,2	0,4	0,5	0,5
40m	40m	40m	40m
0,8	0,6	0,5	0,5

Sensibilidades resultantes

Manglar (60m) Tierra adentro 0,7889	Estuarios (60m) Tierra adentro 0,6754	Urbano (60m) Tierra adentro 0,5884	Playa Arenosa (60m) Tierra adentro 0,5472
Manglar Orilla (40m) 1,3889	Estuarios Orilla (40m) 0,8754	Urbano Orilla (40m) 0,5884	P. arenosa Orilla (40m) 0,5472

**Figura III.18.** Modelo de adición con dos criterios y pesos calculados con EMC

### **III.8.- Modelo aplicando EMC, Variables lingüísticas y Números Difusos**

#### **III.8.1.-Utilización de las medidas difusas en las reglas de decisión.**

Recordando lo afirmado por Jiang e 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, en la intersección (AND) booleana se ejecuta una decisión muy “dura” (se obtiene si se cumplen las dos condiciones), en la unión (OR) booleana una decisión muy “suave” (si se cumple al menos una de las condiciones). En la Combinación Lineal Ponderada (CLP), un bajo peso en un criterio puede ser compensado por uno alto en otro criterio, lo que se conoce como intercambio (trade-off) o sustitubilidad. El segundo problema tiene que ver con la normalización de los factores en la CLP, el enfoque más común es reescalar el rango a una base numérica común por una simple transformación lineal. Sin embargo, el razonamiento de esto no está muy claro, por ejemplo, para determinar la ubicación apropiada de una instalación industrial, definir si una determinada localidad se considera “muy lejana”, o con “mucha pendiente”, quién define tales límites?.

El tercer problema se relaciona al riesgo de decisión, lo cual puede ser considerado como la probabilidad de que la decisión será incorrecta. En el procedimiento booleano, el riesgo de decisión puede ser estimado mediante la propagación del error de medición a través de la regla de decisión, con lo cual, se podría determinar el riesgo de que la decisión hecha para una localidad dada está equivocada. Comparando con la CLP, los criterios continuos parecieran expresar una mayor incertidumbre que no puede ser tan fácilmente estimada con métodos estocásticos. Los factores normalizados de la CLP expresan una perspectiva de adecuabilidad: mientras más alto el puntaje más adecuada es la localidad para un determinado uso (en nuestro caso mayor sensibilidad); sin embargo, no existe un límite real, que permita una definitiva asignación de áreas a ser elegidas o ser excluidas.

Cómo se pueden resolver tales incertidumbres en expresiones de riesgo en la decisión?, Si los criterios manifiestan incertidumbre, porqué se combinan mediante un proceso de promedio?; 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?, cuanta área se va a dedicar a conservación o cuanta 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.

De acuerdo a Eastman (1997), un elemento clave en la incertidumbre en la regla de decisión es establecer la relación entre la evidencia y el conjunto de decisión, en la mayoría de los casos, podemos establecer una relación directa entre ambos, en el sentido de que se puede definir el conjunto de decisión por atributos medibles que sus miembros deben poseer, en algunos casos esos atributos son precisos y no ambiguos. Por ejemplo, se pueden definir aquellas líneas de cloacas en necesidad de sustitución como aquellas de un material y edad en particular (antigüedad, cuantos años definen “viejo”), sin embargo, muy a menudo los atributos que poseen son imprecisos más que precisos.

Continuando con la idea de los párrafos anteriores, en otros casos se pueden definir áreas adecuadas para el aprovechamiento forestal como aquellas áreas forestales que tienen pendientes “suaves” y están “cerca de” caminos. Pero, qué es una pendiente suave?, si especificamos que una pendiente es suave si tiene un gradiente de menos del 5

%, significa esto que una pendiente de 5,0001 % no es suave?, claramente no existe un límite preciso aquí. Tales clases son llamadas conjuntos o clases difusas o imprecisas y son definidos típicamente por una función de membresía. De esta forma podríamos decidir que cualquier pendiente menor a 2 % es incuestionablemente suave, y cualquier pendiente mayor al 10 % es incuestionablemente fuerte, pero aquella membresía en la clase “suave” gradualmente va desde el valor 1.0, a un gradiente de 2 %, a 0.0, a un gradiente del 10 %. Entonces, una pendiente del 5 % puede ser considerada que tiene un valor de membresía de sólo 0.7 en la clase llamada “suave”. Claramente, se pueden hacer las mismas consideraciones acerca del concepto de estar “cerca de” caminos, o en nuestro caso qué es “más sensible”.

Según Eastman (1997) los conjuntos difusos son extremadamente comunes en los problemas de decisión enfrentados con SIG, ellas representan una forma de incertidumbre, pero no son incertidumbre en la medición. El asunto de qué constituye una pendiente suave está sobre el asunto de si una pendiente medida es lo que actualmente está registrado. Es una forma de incertidumbre que yace en el mismo corazón del concepto de factores previamente desarrollado. Los factores continuos de la toma de decisiones multicriterio son de ésta forma funciones de membresía, mientras las restricciones booleanas son conjuntos de funciones de membresía precisas. Pero debe reconocerse que los términos factores o restricciones implican más que lo que representan imprecisión o precisión, más que eso, éstos términos dan también algún significado a la manera en que son integrados con otra información.

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. Malczewski (1999) afirma que el proceso de normalización de criterios de evaluación puede ser visto también como uno de redistribución de valores en el establecimiento de un juego de membresía. En adelante se expondrá cómo diseñar

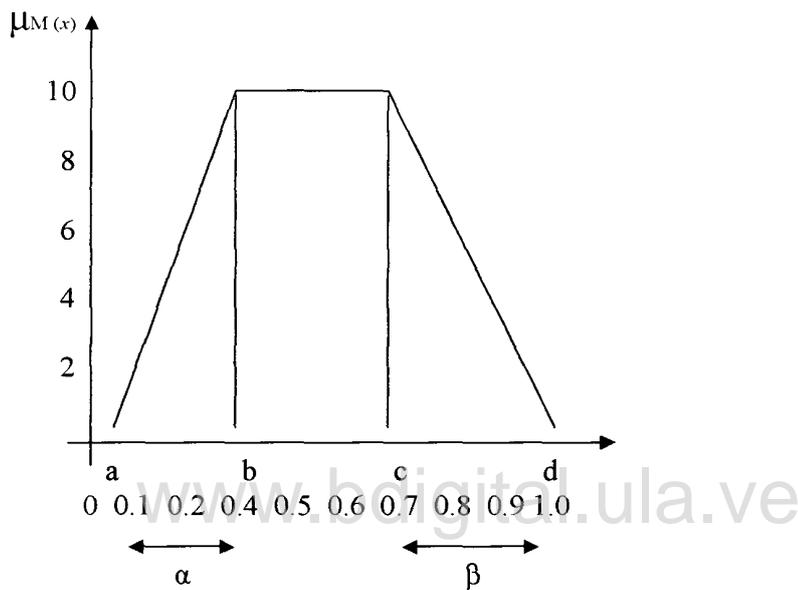
mapas de criterios normalizados de manera que puedan ser utilizados en un análisis espacial multicriterio. Es entonces importante definir dos términos, **números difusos y variable lingüística**.

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. Todo número difuso es un conjunto difuso convexo, la convexidad requiere que la función de membresía sea una pieza continua y exhiba un pico en la cercanía de su punto o intervalo más alto (esto es, en el punto o intervalo donde es igual 1, la función no decrece hacia la izquierda y no crece hacia la derecha). 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). 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 III.18. 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 trapecoide mostrado en la figura. Alternativamente, un número trapezoidal puede ser escrito como  $M = (a, b, c, d)$ . De acuerdo a esto, el trapecoide 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, etc, sensibilidad en nuestro caso.



**Figura III.19.** Numero difuso trapezoidal  $M = (0.1, 0.4, 0.7, 1.0)$ . Tomado de Malczewski (1999).

Los anteriores conceptos serán adaptados a la metodología finalmente propuesta, mediante la conversión en números difusos de las ponderaciones (sensibilidades) obtenidas en las encuestas para los tipos de costa, 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 Método de Ponderación Aditiva Difuso (“Fuzzy Additive Weighting Method” FAWM, Malczewski (1999), que será explicado a continuación.

### III.8.2.- Método de Ponderación Aditiva Difuso (MPAD)

De acuerdo a Malczewski (1999) la idea detrás del MPAD es similar a la del método convencional Ponderación Aditiva Simple (Simple Aditive 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 (figura III.12). Si los atributos y pesos son representados en el formato del número difuso trapezoidal L-R, la utilidad de la alternativa (polígono)  $i$ -ésima ( $i$ th) está dada por:

$$F_i = \sum_j w_j x_{ij}$$

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, p. 231), en el cual un urbanizador debe evaluar las parcelas disponibles más adecuadas para un desarrollo urbanístico, en función de los criterios pendientes y accesibilidad, y cómo de desarrolló su adaptación e implementación en este estudio. Una vez que los mapas-criterio difusos (en nuestro caso las ponderaciones de las sensibilidades de los tipos de costa convertidas a números difusos) y los pesos difusos están identificados, el problema implica ordenar los sectores de terreno de acuerdo a los dos criterios, y teniendo en cuenta la preferencia de los expertos (importancia asignada), método que consiste en tres pasos.

En el ejemplo citado (Malczewski (1999, p. 231), el primer paso implica una operación de multiplicación. Los componentes individuales del número trapezoidal ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ) son multiplicados por los pesos correspondientes; a continuación, el valor para el componente “ $a$ ” del atributo pendiente ( $X_{11a} = 0.4$ ) se multiplica por el correspondiente peso 0.4, que resulta en un valor ponderado de 0.16. De forma similar, los valores

ponderados se obtienen para cada uno de los 4 elementos (a, b, c, d) del número difuso trapezoidal y para los dos criterios.

Continuando con el ejemplo anterior, el segundo paso implica una operación de adición. Los valores resultantes ponderados difusos para los tres atributos, son agregados para cada componente del número difuso trapezoidal. Por ejemplo, el valor 0.52 es la suma de los valores ponderados para los criterios “pendiente y accesibilidad” (0.16 + 0.32) en la parcela 1. Las operaciones de adición se realizan para cada uno de los elementos del número difuso, y esto resulta en la adecuabilidad/idoneidad (sensibilidad en nuestro caso) aproximada de las tres parcelas de tierra de acuerdo a los criterios de evaluación. Finalizando con el ejemplo, el tercer paso implica ordenar las tres alternativas. Esto puede lograrse simplemente representando las alternativas en términos de números difusos derivados de los mapas de utilidad generados en el paso previo. Se expone a continuación la adaptación del método a éste caso.

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, se 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 (anexo 1), al asignarles pesos se pudo cuantificar en cierta forma la sensibilidad, dichas encuestas se procesaron estadísticamente para obtener valores promedios, se aplicó el módulo “WEIGHT” del programa utilizado para generar los pesos respectivos.

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 III.13, y es explicado más adelante.

Los pesos resultantes de las encuestas fueron:

Manglar:	0.5889
Estuario:	0.2754
Urbano:	0.0884
Playa Arenosa:	0.0472

El objetivo es evaluar la sensibilidad de la línea de costa, en función de dos criterios (tipo de costa y distancia 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.

Recordando la escala utilizada en las encuestas, se presenta de nuevo a continuación:

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremadamente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fuertemente	Extremadamente		
	Menos Sensible					Más Sensible		

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), ver tabla III.1.

La anterior escala fue modificada y adaptada por el autor, 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, op cit). Para los tipos de costa, los pesos transformados a números difusos son los siguientes:

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)

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:

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

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 este 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:

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, p. 232), 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. El diseño del modelo final se presenta en la figura No. III.19. Los resultados, su interpretación y análisis se presentan en el siguiente capítulo.

Cada cobertura final (a, b, c, d) se interpreta de la siguiente forma:

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

Se puede notar que el modelo presentado es más completo que el anterior, ya que además de poseer la ventaja de incluir un método de ponderación mejor sustentado que los dos primeros modelos, en vista del uso de la opinión de expertos de forma consistente para la ponderación de la sensibilidad de los tipos de costa, éste 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 pueden 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. Además, se pueden incluir

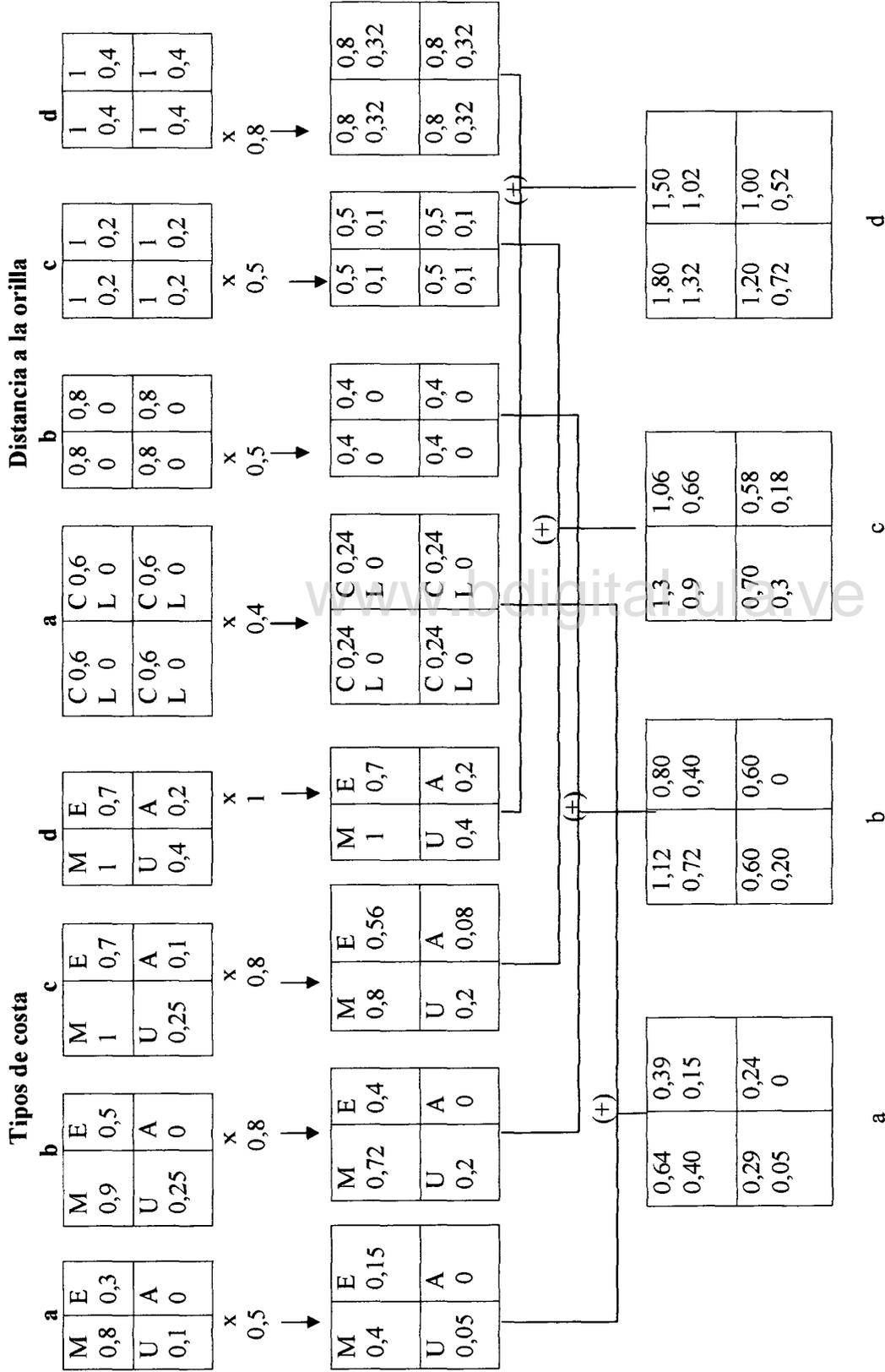
opiniones de otros actores interesados en el proceso de la toma de decisión, lo que modificaría pesos e importancias, y por lo tanto los niveles de sensibilidad.

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.

Términos lingüísticos	Número de			Términos			Lingüísticos		
	Dos	Tres	Cinco	Siete	Nueve				
Muy bajo			0 - 0 - 0,1 - 0,2	0 - 0 - 0,1 - 0,2	0 - 0 - 0 - 0,1			0 - 0 - 0 - 0,1	
Bajo a muy bajo					0 - 0 - 0,1 - 0,2			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			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			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			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			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			0,6 - 0,8 - 0,8 - 1	
Alto a muy alto					0,7 - 0,9 - 1 - 1			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			0,8 - 1 - 1 - 1	

Tabla III.1. Tabla de conversión de términos lingüísticos a números difusos (Tomada de Chen y Hwang, 1992, en Malczewski, 1999).



M: manglar; E: Estuario; U: Urbano; A: Arena; C: Cerca de la costa o menos de 40 m; L: Lejos de la costa o entre 40 y 100 m  
**Figura III. 20.** Esquema del modelo final de sensibilidades con los respectivos escenarios (a, b, c, d)

### III.8.3.- Análisis de sensibilidad del modelo y Manejo del riesgo en la decisión

Como se puede observar, los modelos generados presentan una mejora continua, desde el modelo jerárquico hasta el creado con MPAD, el primero consiste en una jerarquización sencilla de las sensibilidades del medio, en este caso la línea de costa; el segundo ya posee cierta cuantificación, además del hecho de que los resultados dependen de dos factores; el tercero incluye la fortaleza de encuestar a expertos (lo que aporta su experiencia y resume los posibles índices a utilizar) y el uso del método de comparación por pares en la generación de los pesos asignados. Por último, el modelo finalmente propuesto y generado con MPAD, además de aprovechar los pesos generados por los expertos con la EMC, nos ofrece la oportunidad de la creación de escenarios, e incluso es posible desarrollar un análisis de sensibilidad del mismo y por lo tanto experimentar con el manejo del riesgo en la decisión.

De acuerdo a Gómez y Barredo (2006) “el Análisis de Sensibilidad comprende la última fase del modelado espacial, en la cual se pretende llevar a cabo un **análisis de la estabilidad** del modelo desarrollado. Los análisis de sensibilidad están directamente relacionados con la elaboración de modelos en cualquier campo científico. Un modelo es una versión simplificada de la realidad que nos permite describir y comprender mejor un determinado problema, tomando los elementos y mecanismos esenciales de los sistemas del mundo real, tanto físicos, como sociales, económicos o medioambientales. Los investigadores han de esforzarse por demostrar que esos modelos son representaciones fiables de aquellos sistemas reales; para ello, es necesario llevar a cabo determinados procesos de validación que proporcionen la suficiente credibilidad a sus creaciones”.

Quereshi et al (1.999) citado en Gómez y Barredo (2006), afirman que el **proceso de validación** de cualquier modelo debería estar formado por tres componentes, a saber:

a) Verificación: a través del cual nos aseguramos que el modelo está desarrollado de manera correcta (formalmente hablando) y de acuerdo a una metodología específica, es decir, si el modelo está correctamente construido.

b) Validación: se trata de comprobar si la estructura del modelo es adecuada para obtener el fin perseguido (si se ha construido el modelo correcto desde un punto de vista conceptual y operacional) y con él se consigue un nivel aceptable de precisión en las predicciones. En el caso de los modelos explicativos o predictivos, normalmente esta validación se lleva a cabo comprobando el grado de acuerdo entre los datos arrojados por el modelo y los datos del sistema real.

c) Análisis de sensibilidad: su misión es comprobar la estabilidad del modelo (o su comportamiento predictivo), examinando la variación que se produce en los resultados cuando se realizan variaciones sistemáticas en un rango de interés sobre uno o varios parámetros de entrada. Los resultados nos indicarán qué partes del modelo habrá que seguir perfeccionando en las siguientes versiones del mismo.

En relación a la Verificación del modelo propuesto, se puede afirmar que ya que ésta es una propuesta metodológica, como parte de una tesis doctoral, y que ha pasado por diferentes revisiones, tanto por parte del autor como por parte del tutor, e igualmente por parte de un jurado revisor, está correctamente construido, por supuesto que, está sujeto a mejoras que propongan otros investigadores, mejoras que pueden ser incorporadas al mismo. En cuanto a la validación del modelo, se discute en la última parte de éste capítulo.

En cuanto al análisis de sensibilidad del modelo (no confundir con sensibilidad del medio), como se dice anteriormente, se refiere a cómo cambian los resultados (las cuatro coberturas a, b, c, y d) al cambiar la información de entrada. Según Gómez y Barredo (2006) “este tipo de análisis de sensibilidad (*What if?*) fue popularizado por los Sistemas Interactivos de Ayuda a la Decisión (SIAD). Unos se basan en los datos y otros se refieren a los modelos (de decisión). Lo más habitual es

realizar un análisis del primer tipo (es decir, basado en los datos), con el fin de responder preguntas como:

- ¿Cambiará la ordenación si cambiamos los pesos?
- ¿Cómo cambiará la solución óptima si cambiamos los parámetros más importantes del modelo?
- ¿Entre qué límites pueden variar los parámetros sin que se afecte la ordenación final?
- ¿Podemos obtener zonas de parámetros que dejen intacto el resultado final?

Los métodos más empleados se han centrado, tradicionalmente, en la simulación de diferentes escenarios en los que se introducen algún tipo de variación sobre los pesos otorgados a los factores, o sobre la importancia que se les asigna". Según Saltelli et al (2000), citado por Gómez y Barredo (2006), los métodos de análisis de sensibilidad se pueden agrupar en tres tipos:

**1.- Métodos Pantalla (*screening methods*):** su utilización es apropiada en aquellos modelos que necesitan una gran carga computacional para ser evaluados (normalmente porque el número de factores implicado es elevado). Mediante estos métodos podemos averiguar qué factores son los responsables de la mayoría de la variabilidad de los resultados y ordenarlos según su incidencia en esa variabilidad.

**2.- Métodos locales.** Con estos métodos se obtiene el impacto local de los factores en el modelo, observando el efecto que produce en los resultados la variación de cada factor de entrada, mientras los demás permanecen constantes (procedimiento denominado OAT, *One-factor-At-a-Time*). El resultado es una serie de valores (uno para cada factor) que define la tasa e cambio en los resultados del modelo, relativa a la tasa de cambio en los factores de entrada. La variación de los parámetros de entrada suele realizarse dentro de un intervalo reducido de  $\pm 5\%$  (normalmente el mismo para todos) o en torno a un valor "nominal" (fijado previamente), de ahí el nombre de locales.

**3.- Métodos globales.** El objetivo es poder calcular la cantidad de incertidumbre en los resultados (predicciones) del modelo que es debida a la incertidumbre de cada uno de los factores de entrada. Es decir, mediante estos métodos no solo podemos averiguar si las variaciones en los factores de entrada están provocando variaciones significativas en los resultados, sino que además podemos averiguar en qué proporción.

En realidad esta clasificación podría reducirse a los dos últimos grupos, puesto que todos los métodos pantalla pueden considerarse locales o globales, dependiendo del tratamiento otorgado a los factores. Así mismo, cabría proponer otra agrupación en métodos cualitativos y cuantitativos, ya que mientras los métodos pantalla sólo nos indican cuáles son los factores decisivos en el modelo analizado y los ordena en función de su influencia en la variación de los resultados, los métodos locales y globales nos permiten averiguar en qué proporción lo hacen (Gómez y Barredo (2006).

www.bdigital.ula.ve

De acuerdo a lo anterior, se propone entonces lo siguiente para conocer la sensibilidad o estabilidad del modelo, en el entendido de que se aplica un método local. Al cambiar los pesos de la importancia dada a cada criterio también pueden cambiar los resultados finales, ya que si cambian los términos lingüísticos utilizados podemos modificar las sensibilidades finales. Igualmente, lo anterior permite experimentar con el riesgo en la decisión, esto es, de que la decisión tomada sea errónea o conduzca a medidas correctivas o de asignación de recursos equivocadas, como lo plantean Jiang e Eastman (2000). Obsérvese a continuación un ejemplo de lo anterior.

En el modelo inicial, para la “Importancia” de ambos criterios, se crearon los siguientes números difusos:

<b>Criterio</b>	<b>Pesos</b>	<b>Términos lingüísticos</b>	<b>Números difusos</b>
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)

Y el resultado, los escenarios a, b, c, y d, fue el siguiente:

0,64 0,40	0,39 0,15	1,12 0,72	0,80 0,40	1,30 0,90	1,06 0,66	1,80 1,32	1,50 1,02
0,29 0,05	0,24 0	0,60 0,20	0,60 0	0,70 0,30	0,58 0,18	1,20 0,72	1,00 0,52

Como propuesta de análisis de sensibilidad del modelo y para experimentar con la estabilidad del mismo, se hacen los siguientes cambios. Se modifican los pesos asignados a la “importancia” de cada criterio, recordando un cambio de alrededor del 5 %, el peso de 0,7 dado a la importancia del factor “Tipo de costa” (incrementándole importancia) pasaría a ser 0,735, veamos que pasa si redondeamos a 0,8 (en este caso es aproximadamente un 14% de variación), por lo tanto el peso asignado al factor “Distancia a la orilla” pasaría a ser 0,2 (perdiendo importancia), entonces cambian los términos lingüísticos y por lo tanto los números difusos respectivos. Entonces, para la “Importancia” de ambos criterios se crean los siguientes números difusos:

Criterio	Pesos	Términos lingüísticos	Números difusos
Tipo de costa	0,8	Extremadamente importante	(0,8 – 1 – 1 – 1)
Distancia a la orilla	0,2	Poco importante	(0,0 – 0,0 – 0,1 – 0,2)

Al hacer las operaciones respectivas se genera el siguiente resultado (ver tabla III.2).

0,64 0,64	0,24 0,24	0,9 0,9	0,5 0,5	1,1 1,02	0,71 0,72	1,20 1,04	0,90 0,74
0,08 0,08	0 0	0,25 0,25	0 0	0,35 0,27	0,11 0,12	0,42 0,48	0,22 0,28
a		b		c		d	

Tabla III.2. Resultados con pesos de la “Importancia” de criterios modificados

Recordemos de nuevo que las cuatro coberturas finales (a, b, c, d) se interpretan de la siguiente forma:

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

Como se puede observar, todos los escenarios finales cambian. El orden de las sensibilidades de la cobertura “a”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 0,64 para el Manglar cercano a la costa e igual para el Manglar lejano a la costa, 0,24 para el Estuario cerca y lejos de la costa, 0,08 para lo Urbano cerca y lejos de la costa, y valor “cero” para la sensibilidad de la costa arenosa.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “b”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 0,9 para el Manglar cerca de la costa e igual para el lejano a la costa, 0,5 tanto para el estuario cercano y lejano a la costa, 0,25 para la costa urbana cerca y lejos de la orilla, y, en este escenario la costa arenosa tampoco presenta sensibilidad.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “c”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 1,1 para el Manglar cerca y 1,02 lejos de la costa, 0,71 para el Estuario cerca de la costa y 0,72 estuario lejano de la costa, 0,35 para la costa urbana cerca y 0,27 urbano lejos de la orilla, y 0,11 para la costa arenosa cerca y 0,12 lejos de la orilla. Como se puede observar en ésta cobertura la costa arenosa comienza a presentar valor en su sensibilidad.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “d” (los mayores valores), de mayor a menor, es el siguiente: 1,2 para el manglar cercano a la costa, 1,04 para el manglar lejano a la costa, 0,9 para el Estuario cerca de la costa, 0,74 para el Estuario lejos de la costa, 0,42 para lo urbano cerca de lo costa, 0,48 para lo urbano lejos de la

costa, 0,22 para la costa arenosa cerca de la costa, y, por último, 0,28 para la costa arenosa lejos de la costa.

Comparando solamente los dos escenarios finales “d”, se detecta lo siguiente:

1,80	1,50	1,20	0,90
1,32	1,02	1,04	0,74
1,20	1,00	0,42	0,22
0,72	0,52	0,48	0,28

Escenario “d” Original      Escenario “d” con cambios

En general los valores finales de las sensibilidades cambian, disminuyendo, y en algunos caso cambiando su ordenación. En el modelo original resultó la siguiente ordenación: de 1ro) 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), 2do) le sigue el Ecosistema estuarino cerca de la orilla (1,5), 3ro) el manglar entre 40 y 100 m costa adentro (1,32), 4to) la costa urbana cerca de la orilla (1,2), 5to) el estuario costa adentro (1,02), 6to) la playa arenosa cerca de la orilla (1,0), 7mo) la costa urbana lejos de la orilla (0,72), 8vo) la playa arenosa lejos de la orilla (0,52).

En el modelo con cambios en sus valores de entrada, se obtiene el siguiente orden: 1ro) 1,2 para el manglar cercano a la costa (34 % de variación en su sensibilidad y se mantiene en el mismo lugar), 2do) 1,04 para el manglar lejano a la costa (estaba en 3er lugar), 3ro) 0,9 para el Estuario cerca de la costa (estaba de 2do), 4to) 0,74 para el Estuario lejos de la costa (estaba de 5to), 5to) 0,42 para lo urbano cerca de lo costa (estaba de 4to), 6to) 0,48 para lo urbano lejos de la costa (estaba de 7mo), 7mo) 0,22 para la costa arenosa cerca de la costa (estaba de 6to), y 8vo) , por último, 0,28 para la costa arenosa lejos de la costa (se mantiene igual).

Se puede observar que al cambiar los valores de entrada en el modelo de la “Importancia” de los dos criterios, podemos cambiar los resultados finales, y de ésta

forma nos permite evaluar su estabilidad. Igual sucedería al cambiar los valores de los pesos asignados por los expertos a los “Tipos de costa”, e igualmente al cambiar los pesos asignados a las diferentes distancias a la orilla del criterio “Distancia a la orilla”. Es cuestión de determinar qué valores o porcentajes de cambio permiten responder las preguntas planteadas por Gómez y Barredo (2006):

- ¿Cambiará la ordenación si cambiamos los pesos?
- ¿Cómo cambiará la solución óptima si cambiamos los parámetros más importantes del modelo?
- ¿Entre qué límites pueden variar los parámetros sin que se afecte la ordenación final?
- ¿Podemos obtener zonas de parámetros que dejen intacto el resultado final?

Experimentando con los valores de entrada podemos responder las anteriores interrogantes.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

#### **- Validación del modelo final propuesto**

En relación a la validación del modelo final propuesto, se puede decir que, en este caso, se identifican limitantes para lograr tal objetivo, si aceptamos que el mismo es “comprobar el grado de acuerdo entre los datos arrojados por el modelo y los datos del sistema real”. Entre las razones para afirmar lo anterior, se tienen las siguientes:

1.- existe una limitante de peso que restringe recorrer el área de estudio, la cual es su magnitud o extensión de la misma. Igual que para el reconocimiento y diagnóstico, para intentar validar el modelo se debería hacer un recorrido de la misma, la línea de costa, lo que fue imposible realizar por la falta de medios y logística para tal fin, a pesar de que se le ofreció el presente proyecto de investigación a diferentes instituciones y entes relacionados al manejo y gestión de la cuenca del Lago de Maracaibo.

2.- el recorrido de la línea de costa pudiera hacerse con medios de transportes terrestres, acuáticos y aéreos, la falta de recursos económicos para tal fin no permitió tal tarea.

3.- el hecho de que las sensibilidades finales son producto de la opinión de expertos, y en algunos casos del autor, siempre habrá una carga de subjetividad en el resultado final, por lo tanto, la única manera de reconocer validez en el resultado, la mayor o menor sensibilidad de un tipo de costa, es reconocer también la experiencia, los criterios y argumentos utilizados por cada experto o el mismo autor para la ponderación asignada.

4.- para el modelo finalmente propuesto, la característica innovadora es la generación de escenarios, o diferentes situaciones de sensibilidad, para de ésta manera escoger el que mejor representa la posición o interés del actor que hace tal selección, por lo tanto, sería poco práctico pretender validar el modelo, ya que lo que es de interés de un actor o sector puede no ser lo mismo para otro.

Las ventajas del modelo en si mismo son, primero, la generación de tales escenarios, y segundo, que representa un intento de conciliación entre las diferentes opiniones manifestadas en las encuestas, lo que resulta en una mejora en el proceso de toma de decisión cuando se deben seleccionar las medidas de protección y mitigación, al momento de acontecer un derrame petrolero.

#### **III.8.4.- Aplicación de la Lógica Difusa en la clasificación supervisada de imágenes satelitales**

Tomando en cuenta que se quiere que el modelo final a generar represente las sensibilidades de la línea de costa lo más cercano a la realidad del espacio geográfico que la contiene, se propone a continuación el uso de la Lógica Difusa en la clasificación supervisada de las imágenes satelitales para generar el mapa de uso y cobertura del área de estudio, en sectores que manifiesten límites imprecisos o vagos. Lo anterior permitiría establecer ponderaciones promedios, si se quiere, de las

sensibilidades de cada tipo de costa, es decir, en sectores de transición entre un tipo de costa y otro, sería lógico afirmar que la sensibilidad asignada debe reflejar los valores de los tipos de costa que los integran.

Por lo tanto, continuando con la exploración de técnicas que permitan generar modelos más cercanos a la realidad y que nos brindan una visión parcial de la calidad de información que se genera, procesa y despliega, se experimentó con la aplicación de la Lógica Difusa en la clasificación supervisada de imágenes de percepción remota. Lo anterior con el fin de identificar el potencial de la técnica en generar productos más cercanos a la caracterización real del espacio geográfico, y documentar su aporte a la creación de modelos de decisión más fidedignos y flexibles, en cuanto a las decisiones que serán tomadas por los manejadores de recursos y planificadores del uso de la tierra.

Es bueno resaltar que existen aplicaciones de la Lógica Difusa en el procesamiento digital de imágenes de percepción remota (Capítulo I), aunque en la revisión bibliográfica realizada no se encontró su inclusión modelos predictivos en el área ambiental bajo SIG, con el fin de complementar o mejorar tales modelos. De allí la propuesta de su uso en situaciones que ofrezcan la oportunidad de mejorar el proceso de toma de decisiones, al permitir hacer una mejor descripción del medio en estudio, como se propone en éste trabajo.

Como se dijo anteriormente, en la superficie terrestre los límites entre ecosistemas no son precisos, existen gradaciones. Debido a que las imágenes satelitales facilitadas para ésta investigación tenían un alto porcentaje de presencia de nubes, se debió tomar la decisión de desarrollar la aplicación de ésta técnica solamente para algunos sectores, esto sólo con fines demostrativos de su utilidad. Para lo anterior se analizaron visualmente, a partir de la composición en verdadero color y en zonas libres de nubes, áreas de transición entre sectores urbanos, de manglar o vegetación densa, estuarios y línea de costa sin clasificar. Se expondrá un ejemplo de su utilización, cuyo procedimiento se describe a continuación. Puede verse un ejemplo detallado en Gutiérrez y Jegat (2.005).

Inicialmente se aplicó una clasificación supervisada “dura”, esto es, con firmas de usos y coberturas sin mezclas, posteriormente, se hizo una clasificación supervisada “suave” o “difusa”, utilizando firmas espectrales difusas en coberturas mezcladas, esto es, asignando porcentajes de pertenencia o membresía a cada cobertura. Un resumen del procedimiento se expone a continuación.

Se escogió un sector con la transición antes nombrada, en nuestro caso se seleccionó un sector de costa al oeste del lago, transición entre costa arenosa y manglar. Se generan subimágenes con las bandas 1, 2 y 3, para crear el verdadero color y poder desarrollar el procedimiento. Se analiza visualmente la imagen para identificar los diferentes usos y coberturas presentes, en este caso se tienen los siguientes: tierras agrícolas (con playa arenosa), el cuerpo de agua del lago, y el manglar o bosque inundables. Se hace una clasificación supervisada “dura”, figura No. III.20.

A continuación se hace la clasificación “suave” (figura No. III.21). Igualmente, para éste procedimiento se definen los usos y coberturas de la Tierra sin mezclas, y también se deben establecer los usos y coberturas mixtos, identificados a partir del análisis visual, el procesamiento digital de las imágenes satelitales, y el mapa respectivo de Húber y Alarcón (1988).

A continuación se presentan los usos y coberturas de la Tierra sin mezclas y mezclados o mixtos:

-Usos y coberturas sin mezclas:

Lago

Costa Arenosa con Terrenos Agrícolas asociados

Manglar.

- Usos y coberturas mezclados:

Costa arenosa asociada con Terrenos agrícolas y Manglar: TAM

El siguiente paso es construir la Matriz de Partición Difusa en el SIG. De acuerdo a Eastman (1997), el procedimiento es el siguiente. En IDRISI® se ha implementado un procedimiento (ejemplo) para el desarrollo de firmas difusas, basado en la investigación de Wang (1990) citado por Eastman (1997), que utiliza el concepto de conjuntos difusos. En el ejemplo se considera que cada píxel posee algún grado de membresía en más de un conjunto (clase) de acuerdo al grado al cuál las mezclas de esas clases existan dentro del píxel, así por ejemplo, si un píxel está cubierto 60 % por especies de coníferas y 40 % por deciduas, se consideraría que tiene un grado de membresía difuso de 0.60 en el conjunto coníferas y un grado de membresía de 0.40 en el conjunto decidido.

En nuestro caso, una vez analizadas visualmente las imágenes satelitales, y constatados los grados aproximados de membresía o porcentajes de pertenencia de cada tipo de uso o cobertura de la Tierra, se crean las muestras de entrenamiento o firmas difusas. A continuación se presentan los grados de membresía identificados:

IDR_ID	Lago	AgricArena	Manglar	TAM
1 Lago	1	0	0	0
2 AgricArena	0	1	0	0
3 Manglar	0	0	1	0
4 TAM	0	0.20	0.20	0.60

Posteriormente, con las muestras de entrenamiento se procede a generar la clasificación “suave” de las imágenes, la cuál se puede ver en la figura No. III.21.

Para las muestras de entrenamiento difusas:

Lago: id 1

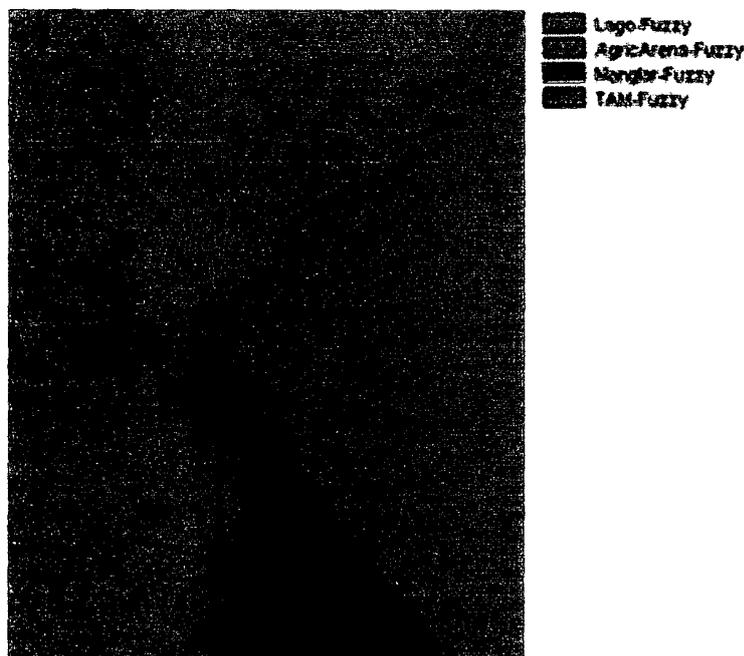
AgricAren: id 2

Mang: id 3

TAM: id 4 Combinación de costa Arenosa con Terrenos Agrícolas y Manglar



**Figura III.21.** Sector de transición entre costa arenosa (con terrenos agrícolas asociados) y costa de manglar y su clasificación supervisada “dura”



**Figura III. 22.** Clasificación “suave” con firmas difusas de sector con costa arenosa (con terrenos agrícolas asociados) y manglar.

Como puede observarse, al comparar ambas imágenes resultantes (clasificaciones dura y suave) existe una clara diferencia en cómo el sistema las clasifica o genera mapas de uso y cobertura. Al hacer una clasificación “dura” el sistema genera sectores con límites precisos, lo cual en la realidad no es de ésta manera en el sector de transición entre el manglar y la costa arenosa, la cual está asociada a tierras agrícolas, existen zonas donde el manglar se mezcla con la costa arenosa y las tierras agrícolas, inclusive, puede verse que la línea de costa presenta reflectancias que en algunos casos denotan al cuerpo de agua con tonalidades que denotan la presencia de arena en suspensión. Lo anterior puede ser observado en la clasificación “suave”, en la que se aplicó la lógica difusa.

La ventaja de la aplicación de la anterior técnica, además de clasificar el uso y cobertura del área de estudio de forma más próxima a la realidad, esto es, con sus respectivos cambios graduales, es que nos permite definir en tales territorios de usos mixtos, diferentes gradaciones en las respectivas sensibilidades. Por ejemplo, la sensibilidad de un manglar es diferente a la de un estuario, pero la transición entre

ambos pudiera afirmarse que tiene una sensibilidad intermedia; igualmente, no es lo mismo la transición entre un manglar y un estuario, o entre el manglar y la costa de playa arenosa, por lo tanto pasa lo mismo con sus sensibilidades. En función de tales sensibilidades intermedias o difusas, si se quiere, se pueden establecer entonces, en los planes de contingencia, diferentes prioridades de limpieza y recuperación en caso de un derrame, en otras palabras tomar diferentes decisiones.

Se puede entonces aprovechar la anterior técnica para desarrollar modelos descriptivos de la superficie terrestre más adecuados a la realidad del ambiente, y de ésta forma asignar las sensibilidades finales de forma más veraz por parte de los expertos, con más detalle, ya que se les presentarían descripciones del medio más cercanas a la realidad.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### **IV.1.- Resultados, interpretación y análisis**

Una vez desarrollado el proceso metodológico, se obtuvieron los siguientes resultados:

Con el fin de generar como producto final un Índice de la Sensibilidad de la línea de costa, se diseñaron cuatro métodos de modelaje utilizando SIG, los métodos generados fueron los siguientes: un modelo de Jerarquización simple (Ordenación por rangos) de las sensibilidades de los tipos de costa, un modelo de Adición simple con dos criterios, un Modelo de Adición con dos criterios utilizando Evaluación Multicriterio para la generación de pesos y, por último, el Modelo de Ponderación Aditiva Difusa (MPAD). Cada modelo representa las sensibilidades de la línea de costa, pero, como afirma Canter (1.997) 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 éste estudio hace énfasis en el uso de técnicas que ayuden a mejorar tal proceso.

Habiendo determinado los componentes que se considera influyen en la sensibilidad de la línea de costa, y al conocer las necesidades de información, se procedió a su identificación mediante diferentes técnicas digitales de procesamiento de imágenes satelitales y uso del SIG. Inicialmente, se seleccionaron las bandas, del satélite LANDSAT-TM+, a utilizar para generar combinaciones de las mismas que permitieran la interpretación visual, lo anterior se hizo mediante la técnica del Análisis de Componentes Principales. Se crearon entonces el verdadero y los falsos colores a partir de la combinación de las bandas seleccionadas, para la identificación de los tipos de costa, apoyados en los mapas topográficos de cartografía nacional a escala 1:100.000 y en el de vegetación de Venezuela, técnicas que facilitaron la tarea.

Para mejorar la interpretación se digitalizó información auxiliar como vías, hidrografía, centros poblados, con el fin de identificar los componentes de la línea de

- Capítulo IV. Análisis de resultados

costa, proceso que fue facilitado con el apoyo de tal información auxiliar. La identificación de la costa de tipo urbano fue generada a partir de la anterior información, la cual se manejó mediante el Sistema de Información Geográfica.

Se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para facilitar la identificación de los ecosistemas costeros, como manglares y estuarios, así como la interpretación de áreas inundables. La imagen IVDN facilitó la delimitación de tales ecosistemas y zonas especiales.

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 necesarias, esto es, cuatro mapas para el tipo de costa, cuatro mapas para la distancia a la orilla, y se aplicó el Método de Ponderación Aditiva Difuso, ya explicado.

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.

- Capítulo IV. Análisis de resultados

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 un mecanismo de renovación o limpieza, lo que lo haría menos vulnerable a un derrame. Recordemos que Michel et al (1.978) 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 y sitios turísticos. Elementos claves de una costa urbana y por lo tanto un factor con influencia en la decisión de definir su sensibilidad.

Por último, se encuentran con el menor peso las playas arenosas (las que no estén asociadas a zonas urbanas), ya que se pudiera afirmar, además de la facilidad de su limpieza (en un todo de acuerdo con Jensen et al, 1.990), 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

- Capítulo IV. Análisis de resultados

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.

0,64	0,39	1,12	0,80	1,3	1,06	1,8	1,5
0,4	0,15	0,72	0,40	0,9	0,66	1,32	1,02
0,29	0,24	0,60	0,60	0,7	0,58	1,2	1,0
0,05	0	0,20	0	0,3	0,18	0,72	0,52
a		b		c		d	

En este caso se seleccionó la cobertura con las sensibilidades mayores (d) para representar los resultados en el mapa final. Es bueno recordar que las cuatro coberturas finales a, b, c, d, se interpretan de la siguiente forma:

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

El orden de las sensibilidades de la cobertura “a”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 0,64 para el manglar cerca de la costa, 0,40 para el

- Capítulo IV. Análisis de resultados

manglar lejos de la costa, 0,39 para el estuario cerca de la costa, 0,29 para lo urbano cerca de la costa, 0,24 para la costa arenosa cerca de la costa, 0,15 para el estuario lejos de la costa, 0,05 para lo urbano lejos de la costa, y 0,0 para la costa arenosa lejos de la costa. Como se puede observar, según estos resultados, la costa de manglar, sobre la línea de costa y costa adentro es lo más sensible; siguiéndole el estuario sobre la línea de costa, después lo urbano sobre la línea de costa, seguido de la costa arenosa cerca de la línea de costa, y así sucesivamente. Según el resultado anterior, se puede observar que, en esta cobertura “a”, la costa arenosa alejada más de 60 m de la línea de costa no es sensible.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “b”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 1,12 para el manglar cerca de la costa, 0,80 para el estuario cerca de la costa, 0,72 para el manglar lejos de la costa, 0,60 tanto para lo urbano cerca de la costa como para la costa arenosa en sus primeros 40 m, 0,40 para el estuario lejos de la costa, 0,20 para lo urbano lejos de la costa, y 0,0 para la costa arenosa a más de 60 m de la orilla. Se puede notar que en este escenario hay algunos cambios, entre otros, la segunda mayor sensibilidad se le asigna al estuario cerca de la costa, diferente al anterior escenario, en el cual el manglar en toda su extensión obtenía las dos mayores sensibilidades. Aunque, al igual que el escenario anterior, la costa arenosa alejada más de 60 m de la línea de costa sigue resultando como no sensible o de sensibilidad cero.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “c”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 1,3 para el manglar cerca de la costa, 1,06 para el estuario cerca de la costa, 0,9 para el manglar lejos de la costa, 0,7 para lo urbano cerca de la costa, 0,66 para el estuario lejos de la costa, 0,58 para la costa arenosa cerca de la orilla, 0,30 para lo urbano lejos de la costa, y 0,18 para la costa arenosa lejos de la orilla. Ya en este escenario, la costa arenosa lejos de la orilla presenta una sensibilidad de 0,18.

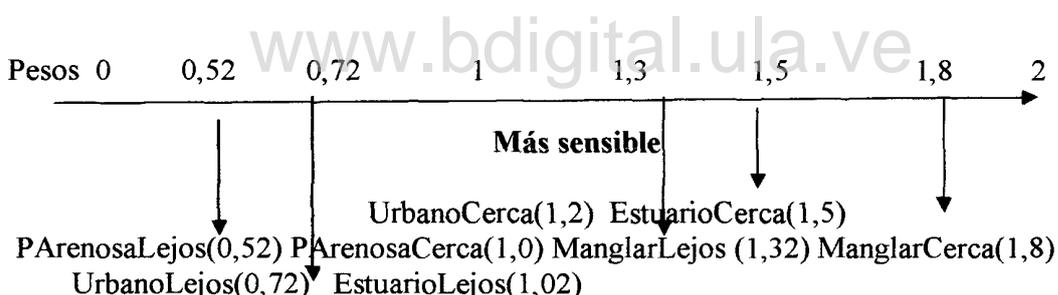
Por observación del modelo matemático se nota que la cobertura “d” es la que tiene los mayores valores, entonces se puede escoger ésta cobertura como resultado

- Capítulo IV. Análisis de resultados

final, 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 IV.1.

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).

Puede observarse lo anterior en una escala continua:



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 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.

- Capítulo IV. Análisis de resultados

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).

Se puede afirmar que cada modelo es superado por el siguiente, desde el más sencillo, la jerarquización simple de las sensibilidades de los tipos de costa, pasando por el segundo el cual se complementa con otro criterio, esto es, distancia la orilla, el tercero, al utilizar EMC permite obtener ponderaciones sustentadas por expertos y con evaluación del grado de consistencia en las opiniones. Y, por último, el MPAD que aprovecha los pesos generados con la EMC, el cual demostró ser el mejor fundamentado teóricamente, tomando en cuenta el grado de facilidad de uso y comprensión por parte del autor, la posibilidad de aplicarse bajo SIG, y además del hecho de su flexibilidad al ser desarrollado bajo el concepto de Lógica Difusa, aplicada a las reglas de decisión, lo que permite la creación de escenarios.

A continuación, y con fines demostrativos, se desarrolló una aplicación de la Teoría de Lógica Difusa en la clasificación supervisada “suave” de imágenes satelitales, mediante la utilización de muestras de entrenamiento con firmas difusas, lo que permitió conocer el potencial de esta herramienta para generar mapas de uso y cobertura más representativos de coberturas mezcladas o transicionales, lo que permite tomas de decisiones mejor adaptadas a la realidad. El uso potencial que se le puede dar a ésta técnica se refiere a la asignación de importancias en función de la

- Capítulo IV. Análisis de resultados

transicionalidad de determinadas coberturas terrestres, como el paso de manglar o costa urbana a playa arenosa, que específicamente son límites difusos, no precisos, por lo tanto son zonas que poseen características de ambas coberturas, y de allí que la importancia a ser asignada debe ser un promedio, si se quiere.

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.

Resumiendo, el modelo propuesto aprovecha el uso de imágenes satelitales para la caracterización del área de estudio, sobretodo tomando en cuenta la extensión del área a analizar, mediante procedimientos analógicos y digitales, como la interpretación visual y los tratamientos digitales, entre los que se tienen el ACP, el IVDN, la composición en verdadero y falsos colores, etc. Igualmente, una vez automatizada toda la información bajo el ambiente de un SIG, hace uso de la EMC (mediante la comparación por pares), para generar los pesos a ser asignados a los componentes de la línea de costa que afectan su sensibilidad, procedimiento que permite tener idea sobre la consistencia de las opiniones emitidas por los expertos. Por último, se usa el potencial de la Lógica Difusa, tanto para el establecimiento de las reglas de decisión (con lo que se pudo crear escenarios de decisión), así como para la representación del uso y cobertura de la tierra más representativas de la realidad del área bajo análisis, mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales.

**IV.2.- Utilización de la banda pancromática o el verdadero color con las diferentes sensibilidades superpuestas.**

Existen diferentes formas de representar los resultados, una de ellas, utilizada por Jensen et al (1990), es superponer los polígonos que representan los tipos de costa y las distancias a la orilla, con sus respectivos niveles de sensibilidades en una degradación de colores, sobre la banda pancromática (en blanco y negro) o cualquier imagen del área de estudio en niveles de grises o a color. Se puede ver tal representación en la siguiente figura (No. IV.1), en la que las sensibilidades, superpuestas a un verdadero color, están representadas por una degradación de rojos (lo más sensible), pasando por anaranjados, hasta amarillo claro (lo menos sensible); representación que permite a los responsables de los planes de contingencia visualizar rápidamente la sensibilidad de los sectores posiblemente afectados por un derrame de acuerdo a la dirección/orientación que éste tenga.

Al disponer de la información bajo un ambiente SIG se pueden hacer consultas sencillas en pantalla o selectivas (en caso de tener bases de datos más complejas); se puede ver un ejemplo del primer caso en la siguiente figura (No. IV.2), en el que mediante un simple “clic” en pantalla sobre el sector del cual queremos conocer información permite obtenerla, en este caso el valor de la ponderación de la sensibilidad obtenida y una característica que describe el polígono respectivo.

En el segundo caso, consulta selectiva, y de acuerdo al grado de elaboración de las bases de datos, se puede consultar, por ejemplo, si existen especies protegidas?, o playas de recreo o turísticas, a qué superficie corresponde?, si tal sector dispone de equipos de limpieza, o vías de acceso y qué tipo?. Lo anterior permite tomar decisiones de forma rápida y efectiva. También, como se afirma anteriormente, las bases de datos pueden ser actualizadas de forma continua, lo cual es una de las ventajas de manejar la información bajo un ambiente SIG.



Legenda transformada: Muy sensible Medianamente sensible Poco sensible



Figura IV.1. Sensibilidades finales de la línea de costa

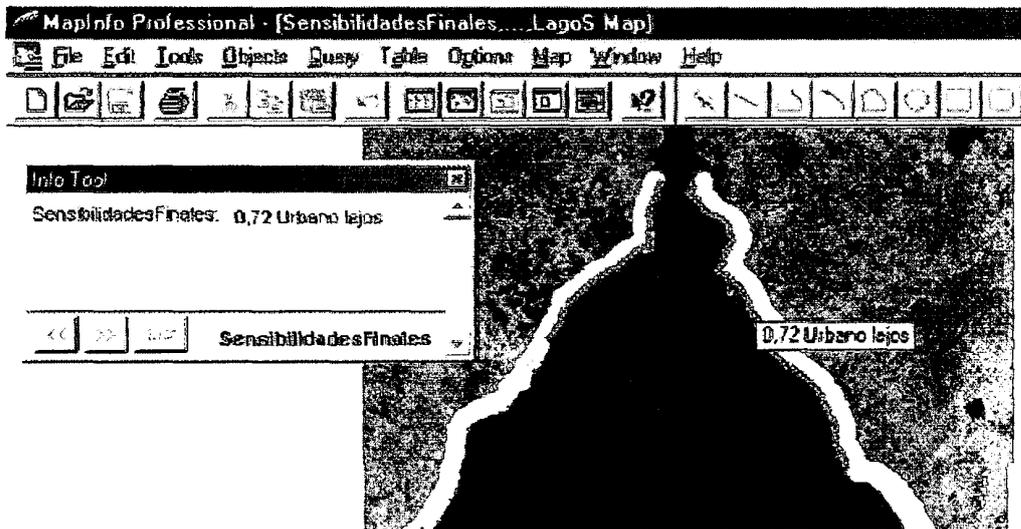


Figura IV.2. Consulta al SIG en pantalla

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### V.1.- Conclusiones

Las conclusiones se elaboraron en función del logro de los objetivos planteados en el estudio, y el análisis y discusión de los resultados.

- La técnica del Análisis de Componentes Principales ayudó efectivamente en la selección de las bandas a utilizar en la construcción de los falsos colores, incluyendo en éstas la mayor cantidad de información disponible en el juego de bandas, lo que redundó en un menor esfuerzo en tal selección, y facilita la identificación de elementos de interés al hacer análisis visual de los diferentes falsos colores que se pueden construir.

- Igualmente, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada permitió identificar ecosistemas característicos de la línea de costa del área de estudio, como los manglares y los ecosistemas estuarinos, además de permitir la fácil visualización de áreas inundables. Facilitando de ésta forma la discriminación de los tipos de costa presentes.

- En relación a la utilización de las técnicas de evaluación multicriterio, se puede concluir que el uso de encuestas, para la consulta a expertos, permite asignar ponderaciones en cuanto a las sensibilidades relativas de los diferentes componentes ambientales, mediante la técnica de comparación por pares, lo cual incluso permite conocer la consistencia de tales preferencias y los resultados generados. La integración de tales técnicas con el SIG potencia el proceso de toma de decisiones en el ámbito del manejo de recursos naturales.

- Con los resultados de la encuesta de opinión de expertos se confirma lo afirmado por ICLAM (1991), en el sentido que los manglares están identificados como los de mayor vulnerabilidad o sensibilidad ante un derrame petrolero.
  
- En relación al uso de la Teoría de la Lógica Difusa, los números difusos y su aplicación a las variables lingüísticas, permitieron la adaptación de tales conceptos a la cuantificación de las sensibilidades de los componentes ambientales de la línea de costa, y la asignación de importancias relativas, así como la creación del modelo de decisión con diferentes escenarios, lo que permite la toma de decisión más flexible o con opciones.
  
- Es importante resaltar que debido a la escala de trabajo utilizada en esta investigación, resultante de la extensión del área de estudio, y por razones de costo y logística, no se pudo hacer un recorrido de la misma, fuera aéreo, terrestre o marítimo, lo que ayuda a resaltar la importancia de la utilización de las imágenes de satélite para la generación, recopilación e interpretación de información del uso y cobertura de la línea de costa. A pesar de lo anterior, y con la ayuda de mapas de vegetación y otras fuentes bibliográficas se pudo hacer una descripción aceptable de la misma. Esta es una característica común que se puede encontrar en estudios de este tipo, debido a la magnitud o longitud de los territorios estudiados, generalmente grandes o extensas superficies.
  
- La integración y el manejo de información de diferentes fuentes, generada y manipulada, tanto gráfica como descriptiva, se facilitó mediante el uso del Sistema de Información Geográfica. Una vez creadas las bases de datos, de haber hecho el procesamiento digital de las imágenes satelitales, y de introducir la anterior información en el SIG, el manejo de la misma se hizo de forma más efectiva y rápida, lo que nos permite concluir que la utilización de tales técnicas digitales ayuda de forma significativa el manejo de información de grandes extensiones terrestres y por lo tanto, se potencia el proceso de toma de decisiones, en el manejo de recursos naturales.

- Si recordamos las características ideales de un índice, que son: facilidad de uso, 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. Podemos concluir que el modelo de ASA bajo SIG creado permitió, de forma fácil y efectiva, conocer los diferentes componentes ambientales presentes en la línea de costa del Lago de Maracaibo, determinar las diferentes sensibilidades que les caracterizan, aprovechando la experiencia de los expertos consultados, y crear diferentes escenarios que permiten reflejar las diferentes posiciones de los actores involucrados en el proceso de toma de decisión, e incluso prever la posibilidad de cambios en el tiempo, por la inclusión de otros actores o interesados en los resultados, así como en el espacio, por cambios en las condiciones de los componentes de la línea de costa. Con la ventaja de facilitar el diseño de los planes de contingencia respectivos de producirse un derrame petrolero. Además, al estar el modelo implementado bajo SIG, permite su actualización, la inclusión de otros actores interesados, y la mejora en la escala de detalle al utilizar otras fuentes de información más detalladas, entre otras ventajas.

## **V.2.- Recomendaciones**

En función de las conclusiones se proponen las siguientes recomendaciones:

- En relación a las Técnicas de Evaluación Multicriterio, se recomienda su utilización en estudios o procesos en los que se deben tomar decisiones sobre el manejo y planificación de recursos naturales, integradas con los Sistemas de Información Geográfica.
- Por su efectividad en generar modelos de la realidad más representativos, se recomienda la utilización de la teoría de la Lógica Difusa tanto en el diseño del modelo de decisión final, aplicando el MPAD a las reglas de decisión, así como en la clasificación supervisada de imágenes satelitales.

- Las imágenes satelitales resultaron ser un producto muy útil en el reconocimiento de los componentes de la línea de costa, por lo tanto se recomienda enfáticamente en estudios de este tipo, en los que se deben analizar y evaluar grandes extensiones.

- La técnica del Análisis de Componentes Principales ayudó efectivamente en la selección de las bandas a utilizar en la construcción de los falsos colores, por lo tanto, se puede afirmar que es una técnica recomendable en la selección de las bandas adecuadas para la identificación de los usos y coberturas presentes en determinada área de estudio.

- Igualmente, se recomienda el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para la identificación de ecosistemas con presencia de vegetación fotosintéticamente muy activa (como los manglares, bosques densos) o cualquier vegetación inundable.

- Debido a limitaciones financieras y logísticas y por el tamaño del área de estudio, la identificación de los diferentes elementos o componentes ambientales, en la elaboración del modelo de sensibilidad, se hizo a partir del análisis visual de las imágenes satelitales, mediante diferentes técnicas de procesamiento digital de las mismas, y extracción de información de mapas existentes (de vegetación, de cartografía nacional), por lo tanto, de disponerse de recursos y logística, se recomienda hacer reconocimientos más detallados de la línea de costa para identificar elementos más específicos de la misma y mejorar la escala de detalle.

- En costas con áreas urbanas, se podrían recomendar las siguientes reglas de decisión, supóngase que el derrame ocurre en las cercanías de un centro poblado, pero se acepta que la calidad visual del paisaje se verá más afectada mientras más cerca de ese centro urbano llegue el derrame (por concentración poblacional, de actividades, etc.), entonces, estableciendo una distancia tope, pudieran ser 1000 m de los límites urbanos (en la costa), es más vulnerable a medida que esa distancia es más corta, por lo tanto la sensibilidad se incrementa a medida que se acerca a al centro de la ciudad. Se pudiera establecer entonces una regla de decisión con medidas difusas

con la siguiente condición, es “más” sensible mientras “más cerca” esté del centro a partir del límite urbano en la línea de costa. Ésta opción no fue evaluada en este estudio.

- Por último, se recomienda el uso de las anteriores técnicas en estudios que presenten características similares, así como el manejo de la información ambiental de forma automatizada, mediante los Sistemas de Información Geográfica. Igualmente, en estudios que requieran la asignación de pesos o ponderación de factores, como los de Ordenación Territorial, Evaluación de Riesgos Naturales, etc.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**Referencias Bibliohemerográficas**

- (1) **Ariza, F.; Pinilla, C. 2.000.** Las componentes de la calidad del dato geográfico. Mapping, No.61.
- (2) **Banco Mundial. 1992.** Libro de consulta para Evaluación ambiental. Volumen III. Lineamientos para Evaluación Ambiental de los proyectos Energéticos e Industriales. Departamento de Medio Ambiente. Washington, USA.
- (3) **Barredo, J. 1996.** Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. RA-MA. Madrid. 264 p.
- (4) **Benítez, J. 1998.** Apuntes de la materia Evaluación de Impacto Ambiental, del postgrado en Ingeniería Ambiental, Universidad Católica Andrés Bello. Caracas
- (5) **Birkin, M. et al. 1987.** Geographical Information Systems and model-based locational analysis; ships in the night of the beginnings of a relationship?. WP-498, School of Geography. University of Leeds.
- (6) **Bosque, J. 1992.** Sistemas de Información Geográfica. RIALP. Madrid.
- (7) **Canter, L. 1997.** Manual de Evaluación de Impacto Ambiental: Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Mc Graw Hill. Madrid. 841 p.
- (8) **Carver, S. 1991.** Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems. Vol. 5. No. 3.
- (9) - **CEOTMA. 1984.** Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Ministerio de Obras públicas y Urbanismo. España. 572. p.
- (10) - **Cheng, T.; and Molenaar, M. 1999.** Objects with fuzzy spatial extent. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 65, No. 7, pp. 797-801.
- (11) - **Chrisman, N. R. 1991.** The error component in spatial data. En Geographical Information Systems, Vol. 1: Principles. Edited by: Macguire, D., Goodchild, M. And Rhind, D. England.
- (12) - **Chuvienco, E. 1990.** Fundamentos de Teledetección Espacial. RIALP, Madrid. 453 p.
- (13) - **Chuvienco, E. 1993.** Integration of Linear Programming and GIS for Land-use Modelling. International Journal of Geographical Information Systems. Vol. 7 No. 1.
- (14) - **Conesa, V. 1997.** Guía metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 412 p.

Referencias bibliohemerográficas

- (15) - **Cox, E. 1.994.** The Fuzzy Systems Handbook. Academic Press Limited. USA.
- (16) - **Eastman, J. R.; Kyem, P. A.; Toledano, J.; y Jin, W. 1993.** GIS and Decision Making. Explorations in Geographic Information Systems Technology. Vol. 4. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). Switzerland.
- (17) - **Eastman, J. R.; Jin, W.; Kyem, P. A.; y Toledano, J. 1995.** Raster Procedures for Multi-criteria/Multi-Objective Decisions. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 6, No. 5.
- (18) - **Eastman, J. R. 1997.** Advanced student manual: special topics. IDRISI for Windows. Version 2. Clark Labs. Graduate School of Geography. Clark University.
- (19) - **Edwards, G.; y Lowell, K. E. 1996.** Modeling uncertainty in photointerpreted boundaries. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 62, No. 4, pp. 377-391.
- (20) - **Ercanoglu, M.; y Gokceoglu, C. 2002.** Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environmental Geology. 41:720-730.
- (21) - **ESRI. 1990.** Understanding GIS, the ARC/INFO Method. Environmental Systems Research Institute. USA.
- (22) - **Fabbri A.; and Patrono, A. 1995-4.** The use of environmental indicators in the geosciences. ITC-Journal.
- (23) - **Fallas, J. 1995-96.** Normas y Estándares para la comunidad de usuarios de Sistema de Información Geográfica en Costa Rica. Revista Geográfica de América Central. Nos. 32-33. p. 41-62
- (24) - **FAO. 1996.** Computer-assisted watershed planning and management. Technologies for national planning. Food and Agricultural Organization of United Nations. Conservation guide 28/1. Roma.
- (25) - **FAO. 2001.** Situación de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- (26) - **Farnworth, E.; y Golley, F. 1977.** Ecosistemas frágiles. Evaluación de la investigación a aplicaciones en los neotrópicos. Instituto de Ecología, Universidad de Georgia. USA
- (27) - **Fisher, P. 1991.** First experiments in watershed uncertainty: the accuracy of the watershed area. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 57, No. 10. p. 1321-1327.

Referencias bibliohemerográficas

- (28) - **Foody, G. 1995.** Cross-entropy for the evaluation of the accuracy of a fuzzy land cover classification with fuzzy ground data. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. Vol. 50, No. 5, p 2-12.
- (29) - **Foody, G. 1999.** The continuum of classification fuzziness in thematic mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 65, No. 4. p. 443-451.
- (30) - **Fotheringham, S.; y Rogerson, P. (Eds) 1994.** *Spatial analysis and GIS*. Taylor and Francis.
- (31) - **Freissinet, C. 1997.** Estimation des imprecisions dans la modelisation du devenir des produits phytosanitaires dans le sols: une methode fondée sur la logique floue. These pour obtenir le titre de docteur, Université Joseph Fourier. Grenoble. France.
- (32) - **Gahegan, M.; y Ehlers, M. 2000.** A framework for the modeling of uncertainty between remote sensing and geographic information systems. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 55, No. 3, p. 176-188.
- (33) - **Gatrell, A. 1987.** On putting some statistical analysis into geographical information systems: with special reference to problems of map comparison and map overlay. Research report n. 5. University of Lancaster: Northern Regional Research Laboratory.
- (34) - **Gómez Orea, D. 1999.** *Evaluación del Impacto Ambiental*. Coedición: Ediciones Mundi-Prensa y Editorial Agrícola Española. Madrid. España. 701 p.
- (35) - **Gómez Orea, D. 2002.** *Ordenación Territorial*. Ediciones Mundi-prensa y Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España. 703 p.
- (36) - **Gómez, M.; y Barredo, I. 2006.** *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. 2da Edición. Alfaomega y Ra-Ma Editorial. 279 p.
- (37) - **Goodchild, M. 1987.** Towards an enumeration and classification of GIS functions. *Proceedings. IGIS 87: the Research Agenda*. R. Aangeenburg y M. Schifman (Eds). Washington DC: NASA, II, 67-77.
- (38) - **Goodchild, M.; Guoqing, S.; y Shiren, Y. 1992.** Development and test of an error model for categorical data. *International Journal of Geographical Science*. Vol. 6, No. 2.
- (39) - **Gopal, S.; y Woodcock, C. 1994.** Theory and Methods for accuracy assessment of thematic maps using fuzzy sets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 60, No. 2. p. 181-188.

Referencias bibliohemerográficas

- (40) - **Guariguata, H.; y Kattan, G. (Eds). 2002.** Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales. Libro Universitario Regional. EULAC-GTZ. Costa Rica.
- (41) - **Gutiérrez, J. 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 Master en Manejo de Cuencas. Centro de estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes, Venezuela.
- (42) - **Gutiérrez, J. 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 Master en Manejo de Bosques. Centro de estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, Venezuela.
- (43) - **Gutiérrez, J.; y Jegat, H. 2005.** Uso de la Teoría de Lógica Difusa en la clasificación de imágenes satelitales con coberturas mixtas: un caso de área urbana, Mérida, Venezuela. *Interciencia*. Vol. 30 (5), mayo, 2005. Venezuela.
- (44) - **Henry, J.; y Heinke, G. 1999.** Ingeniería Ambiental. 2da Ed. Prentice Hall, México. 800 p.
- (45) - **Heuvelink, G.; y Burrough, P. 1993.** Error propagation in cartographic modeling using Boolean logic and continuous classification. *International Journal of Geographical Science*. Vol. 7, No. 3.
- (46) - **Huber, O.; y Alarcón, C. 1988.** Mapa de Vegetación de Venezuela. Ministerio del Ambiente de los Recursos Naturales Renovables. República de Venezuela.
- (47) - **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. Venezuela.
- (48) - **Jankowski, P. 1995.** Integrating Geographical Information Systems and Multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*. Vol. 9.No. 3.
- (49) - **Jáuregui, D. 2003.** Análisis de Sensibilidad Ambiental del espacio geográfico de la Zona Libre, Cultural, Científica y Tecnológica del Estado Mérida, Venezuela. Trabajo de grado. Escuela de Geografía, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes, Venezuela.
- (50) - **Jensen, J. R.; Ramsey, E.; Holmes, J.; Michel, J.; Savitski, B.; y Davis, B. 1990.** Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping for oil spills using remote

Referencias bibliohemerográficas

sensing and geographic information system technology. *International Journal of Geographic Information Systems*. Vol.4, No.2.

**(51) - Jensen, J. R.; Narumalani, S.; Weatherbee, O.; Murday, M.; Sexton, W.; and Green, C. 1993.** Coastal Environmental Sensitivity Mapping for Oil Spills in the United Arab Emirates using Remote Sensing and GIS technology. *Geocarto International* (2) 1.993.

**(52) - Jensen, J. R.; Halls, J.; y Michel, J. 1998.** A systems approach to Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping for oil spill contingency planning and response. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 64, No. 10.

**(53) - Jiang, H.; e Eastman, J. R. 2000.** Application of Fuzzy measures in multicriteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Science*. Vol. 14, No. 2.

**(54) - Kiely, G. 1999.** Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. McGraw Hill. 1331 p.

**(55) - Lunetta, R.; Congalton, R.; Fenstermaker, L.; Jensen, J.R.; McWire, K.; y Tinney, 1991.** Remote Sensing and Geographic Information System data integration: error sources and research issues. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol 57, No. 6.

**(56) - Malczewski, J. 1999.** GIS and Multicriteria Decision Analysis. Department of Geography. University of Western Ontario. John Wiley and Sons, Inc. 391 p.

**(57) - Martínez , R.; Taboada, J.; Ordóñez, C.; y Lanaja, J. 2000.** Análisis multicriterio para la selección de emplazamientos de vertederos de residuos sólidos en el entorno de Valladolid. *Mapping*. No. 60. Marzo 2.000.

**(58)- McGraw-Hill Eds. 2001.** Diccionario Enciclopédico McGraw-Hill Ilustrado. McGraw-Hill Interamerica Editores. S.A de C.V. 1824 p.

**(59) - Metternicht, G. 1999.** Change detection assessment using fuzzy sets and remotely sensed data: an application of topographic map revision. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. Vol. 54, No. 4, p. 221-233.

**(60) - Michel, J.; Hayes, M.; y Brown, J. 1978.** Application of an Oil Spill Vulnerability Index to the shoreline of Lower Cook Inlet, Alaska. *Environmental Geology*, Vol. 2, No. 2. p. 107-117.

**(61) - Molenaar, M.; and Cheng, T. 2.000.** Fuzzy spatial objects and their dynamics. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 55, No. 3, p. 164-175.

Referencias bibliohemerográficas

- (62) - **Mowrer, H T.; Czaplewski, R. L.; y Hamre, R. H. 1996.** Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. 2<sup>nd</sup> International Symposium. Fort Collins. Colorado. USA
- (63) - **Odum, E. P. Ecología. 1969.** Centro regional de Ayuda Técnica. Agencia para el desarrollo Internacional (AID), México. Editorial Interamericana S.A. México.
- (64) - **Pereira, J.; y Duckstein, L. 1993.** A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. International Journal of Geographical Information Systems. Vol. 7. No. 5.
- (65) - **Pujol, P.; y Pujadas, M. 1995-1996.** Uso del suelo y frontera agrícola en el sudeste de Nicaragua. Ejemplo de integración de los Sistemas de Posicionamiento Global, los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección. Revista Geográfica de América Central. Nos. 32-33, p. 143-164.
- (66) - **Rashed, T.; y Weeks, J. 2003.** Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. International Journal of Geographical Science. Vol. 17, No. 6.
- (67) - **Saaty, T.L. 1980.** The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw Hill.
- (68) - **Salazar, J. 1999.** Índices e Indicadores para evaluación y seguimiento ambiental. URL: <http://usuarios.lycos.es/JuanP/impac.htm>
- (69) - **Sandia, L.; y Roa, J. 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.
- (70) - **Seoánez Calvo, M. 1999.** Ingeniería del Medio Ambiente. Edcs Mundiprensa. Madrid. 689 p.
- (71) - **Sheng, T.C. 1.993.** Guide pratique d'aménagement des bassins versant, etude et planification. Cahier FAO conservation. 13/6.Roma.
- (72) - **Stanislowski, L.; Dewitt, B.; y Shrestha, R. 1996.** Estimating positional accuracy of data layers within a GIS thorough error propagation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 62, No. 4. p. 429-433.
- (73) - **Stefanakis, E.; Vazirgiannis, M., y Sellis, T. 1.999.** Incorporating fuzzy set methodologies in a DBMS repository for the application domain of GIS. International Journal of Geographical Science. Vol. 13, No. 7.
- (74) - **Strahler, A.; y Strahler, A. 1997.** Geografía física. Ediciones Omega. 3ra edición.

**ANEXOS**

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS  
Mérida, Junio de 2.004  
ENCUESTA**

**PROFESOR/ESPECIALISTA**

Estimado colega/profesor, debido a sus conocimientos en el área ambiental, usted ha sido seleccionado para colaborar con el trabajo de investigación que adelantamos. La siguiente encuesta tiene por finalidad precisar el grado de sensibilidad del ambiente (físico-natural y socio-económico) o línea de costa ante un derrame petrolero, específicamente en la cuenca del Lago de Maracaibo. Esta investigación forma parte del diseño de un Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental empleando Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de Evaluación Multicriterio.

**ELEMENTOS o CONDICIONES  
(la sensibilidad ambiental está definida/controlada por estos factores)**

- 1.- Línea de costa con manglares o vegetación densa
- 2.- Línea de costa con playa arenosa
- 3.- Línea de costa con ecosistema estuarino
- 4.- Línea de costa con área urbana

Utilizando la siguiente escala de valores, debe asignarle un valor a cada una de las variables, en función de las demás.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremadamente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fuertemente	Extremadamente		
	Menos Sensible				Más Sensible			

**Por ejemplo:** si considera que la presencia de **manglares** es fuertemente más sensible que una **playa arenosa** (o la playa arenosa es fuertemente menos sensible que la presencia de manglares), se le asignaría 7; si considera que es igualmente sensible que un **ecosistema estuarino** le asignaría 1; y si considera que los **manglares** son extremadamente más sensibles que una **costa urbana**, le colocaría 9. Igualmente, si considera que una **playa arenosa** es fuertemente menos sensible que un **ecosistema estuarino** le colocaría 1/7; aunque igualmente sensible a una **costa urbana**, le colocaría 1; por último, si considera que el **ecosistema estuarino** es fuertemente más sensible que una **costa urbana**, le colocaría 7. Por supuesto que a cada variable comparada consigo misma se le asigna 1. Se ubican los valores en la siguiente matriz de comparación de pares:

	Manglares	P. Arenosa	Ec. Estuarino	Urbano
Manglares	1	1/7	1	1/9
Playa arenosa	7	1	7	1
Ec. Estuarino	1	1/7	1	1/7
Urbano	9	1	7	1

**Nota:** en caso de usted considerar que es necesario incluir otra(s) variable(s) que puedan influir en la sensibilidad de la línea de costa, por favor menciónelas y asígneles su valor (variables que pudieran ser incluidas en el modelo de disponerse de la información necesaria para crear las bases de datos (coberturas) requeridas:

**OTRA(S) VARIABLE(S)**

- 1)
- 2)
- 3)

**VALORACION**

	Manglares	P. Arenosa	Ec. Estuarino	Urbano	Var. 4	Var. 5	Var. 6
Manglares	1						
Playa arenosa		1					
Ec. Estuarino			1				
Urbano				1			
Var. No. 4							
Var. No. 5							
Var. No. 6							

Esta encuesta es de tipo confidencial y su información será debidamente resguardada. Los resultados nos ayudarán a ponderar las variables incluidas en el trabajo de investigación emprendido. Agradeciéndole de antemano su atenta colaboración. Se despiden de usted.

MSc: Julián A. Gutiérrez  
 Tesista

Prof. Dr. Hervé Jegat  
 Tutor

**Examen de Tesis Doctoral.**  
**“Diseño de un Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental  
 bajo Sistemas de Información Geográfica (SIG)”**

**Jurado. Profesores:**

**Dra. Magdiel Ablan, Dra. Haydemar Núñez, Dr. José Aguilar, Dr. Hervé Jegat.**

**Aprobado con correcciones formales**

**Correcciones formales. 19-11-07. Julián Gutiérrez.**

- 1.- Resaltar la metodología que se siguió, más que el modelo final que se obtuvo, como el aporte principal del trabajo de tesis. ✓
- 2.- Cambiar algunos términos, particularmente los usados en la descripción difusa del modelo. ✓
- 3.- Aclarar que no se usa la teoría difusa de manera formal. Hacer diagrama de flujo. ✓
- 4.- Proponer cómo se podría hacer un estudio de sensibilidad del modelo. ✓

**Nota:** Las correcciones formales fueron hechas incluyendo comentarios en diferentes partes de la tesis, cambiando unos términos por los sugeridos en la defensa, aclarando el uso dado a la Lógica Difusa, y proponiendo un mecanismo de análisis de sensibilidad del modelo, mediante ejemplo.

- 1.- Resaltar la metodología que se siguió, más que el modelo final que se obtuvo, como el aporte principal del trabajo de tesis. ✓

Pag. IV del resumen ..... Se propone un procedimiento metodológico para el diseño de un modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental (ASA) 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. Se desarrollan y comparan cuatro métodos, (1) Ordenación simple, (2) Adición simple de coberturas con dos criterios, (3) Adición simple complementado con técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), para la generación de pesos (niveles de sensibilidad) mediante opinión de expertos ambientales utilizando comparación por pares, y (4) el método definitivamente propuesto, denominado “Método de Ponderación Aditiva Difusa (MPAD)”, utilizando parcialmente la Teoría de Lógica Difusa, específicamente los Números Difusos. ....

P. IV del resumen ..... **Palabras claves:** Análisis de Sensibilidad Ambiental, Derrames petroleros, Sistemas de Información Geográfica, Técnicas de Evaluación Multicriterio, Números Difusos, Imágenes satelitales, Lago de Maracaibo, Venezuela. ....

p. 5 de la Introducción ..... 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. ....

p. 8 de la Introducción ... Este estudio pretende ser un aporte metodológico al logro de tales objetivos. ...

p. 10 de la Introducción ..... En este trabajo se propone un procedimiento metodológico para la construcción de un Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental bajo Sistemas de Información Geográfica, ejemplificado para la línea de costa del Lago de Maracaibo, que incorpora las bondades de las técnicas y métodos utilizables de forma automatizada, como la Lógica Difusa (los números difusos) y Técnicas de Evaluación Multicriterio, .....

Vo Bo. Dr. José Aguilar



p. 68 del marco teórico ..... La aplicación de la Lógica Difusa, la parte teórica de los números difusos y su inclusión en el diseño del modelo de decisión bajo SIG, y para la clasificación de imágenes satelitales, serán explicadas en el capítulo III Metodología de Análisis de Sensibilidad Ambiental.....

p. 74 del marco teórico .....Entonces, se propone un procedimiento metodológico para la construcción un índice que permita, de forma rápida y eficiente, evaluar la sensibilidad general de la línea de costa, aprovechando el conocimiento adquirido por expertos, que tomen en cuenta las características del medio analizado, los requisitos en la construcción de los indicadores e índices, y ejemplificado para el área de estudio. Por lo tanto, se propone utilizar métodos de ponderación de fácil utilización, aunque sin perder la objetividad, fundamentación teórica, cuantificación deseada, y aprovechando el conocimiento acumulado de tales expertos.

p. 100 de la metodología ..... Por último, utilizando los pesos generados con el MAJ (EMC), se propone la aplicación del Método de Ponderación por Factores (MPAD) mediante el uso de variables lingüísticas y números difusos. Al final se hace una evaluación y comparación de los resultados de los diferentes métodos.

La idea para el método finalmente propuesto, el MPAD fue aprovechar las herramientas que facilita la EMC para generar los pesos correspondientes a las sensibilidades de los tipos de costa,

p. 101 de la metodología..... se hace uso del potencial de la Lógica Difusa, mediante el uso de Números Difusos, para generar escenarios, y de ésta manera lidiar con al anterior aspecto.

Por lo anteriormente expuesto, y con fines comparativos, se presentan los diferentes métodos, desde uno sencillo utilizando la ordenación simple, pasando por dos intermedios utilizando la ponderación de factores, y por último, se propone uno basado en variables lingüísticas y números difusos combinado con la EMC, que permite la creación de escenarios, .....

p. 145 de la metodología ..... Los anteriores conceptos serán adaptados a la metodología finalmente propuesta, mediante la conversión en números difusos de las ponderaciones (sensibilidades) obtenidas en las encuestas para los tipos de costa, 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.....

2.- Cambiar algunos términos, particularmente los usados en la descripción difusa del modelo. ✓ p. 149 de la metodología....

Tipo costa	Pesos	Términos lingüísticos	Números difusos
Manglar	0.5889	Extremadamente sensible	(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)

Vo Bo. Dr. José Aguilar



p. 150 de la metodología.....

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)

### 3.- Aclarar que no se usa la teoría difusa de manera formal. Diagrama de flujo.

Ya resaltado en algunos puntos de la indicación 1, y .....

p. 101 de la metodología ..... Es bueno resaltar que la teoría de lógica difusa es utilizada solamente en la aplicación de números difusos, no se utiliza formalmente la aritmética difusa en las operaciones desarrolladas. Obsérvese a continuación un diagrama de flujo del modelo finalmente propuesto al MPAU.

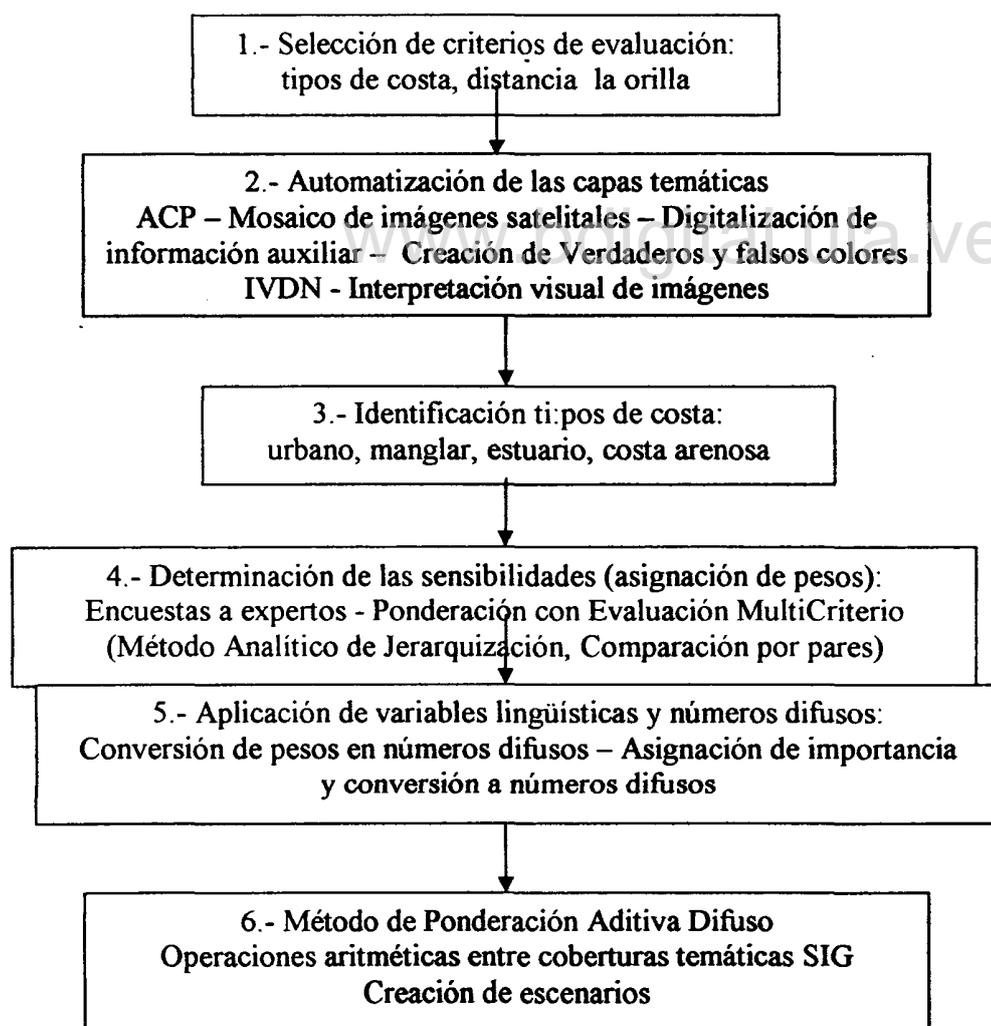


Figura III.1.- Diagrama de flujo de la metodología propuesta

A continuación se describen cada una de los componentes de la metodología propuesta. ...

Vo Bo. Dr. José Aguilar

#### 4.- Proponer cómo se podría hacer un estudio de sensibilidad del modelo. ✓

##### p. 155 de la metodología..... III.8.3.- Análisis de sensibilidad del modelo y Manejo del riesgo en la decisión

Como se puede observar, los modelos generados presentan una mejora continua, desde el modelo jerárquico hasta el creado con MPAD, el primero consiste en una jerarquización sencilla de las sensibilidades del medio, en este caso la línea de costa; el segundo ya posee cierta cuantificación, además del hecho de que los resultados dependen de dos factores; el tercero incluye la fortaleza de encuestar a expertos (lo que aporta su experiencia y resume los posibles índices a utilizar) y el uso del método de comparación por pares en la generación de los pesos asignados. Por último, el modelo finalmente propuesto y generado con MPAD, además de aprovechar los pesos generados por los expertos con la EMC, nos ofrece la oportunidad de la creación de escenarios, e incluso es posible desarrollar un análisis de sensibilidad del mismo (no confundir con sensibilidad del medio) y por lo tanto experimentar con el manejo del riesgo en la decisión.

De acuerdo a Gomez y Barredo (2006) "el Análisis de Sensibilidad comprende la última fase del modelado espacial, en la cual se pretende llevar a cabo un análisis de la estabilidad del modelo desarrollado. Los análisis de sensibilidad están directamente relacionados con la elaboración de modelos en cualquier campo científico. Un modelo es una versión simplificada de la realidad que nos permite describir y comprender mejor un determinado problema, tomando los elementos y mecanismos esenciales de los sistemas del mundo real, tanto físicos, como sociales, económicos o medioambientales. Los investigadores han de esforzarse por demostrar que esos modelos son representaciones fiables de aquellos sistemas reales; para ello, es necesario llevar a cabo determinados procesos de validación que proporcionen la suficiente credibilidad a sus creaciones".

Quereshi et al (1999) citado en Gomez y Barredo (2006), afirman que el **proceso de validación** de cualquier modelo debería estar formado por tres componentes, a saber:

a) Verificación: a través del cual nos aseguramos que el modelo está desarrollado de manera correcta (formalmente hablando) y de acuerdo a una metodología específica, es decir, si el modelo está correctamente construido.

b) Validación: se trata de comprobar si la estructura del modelo es adecuada para obtener el fin perseguido (si se ha construido el modelo correcto desde un punto de vista conceptual y operacional) y con el se consigue un nivel aceptable de precisión en las predicciones. En el caso de los modelos explicativos o predictivos, normalmente esta validación se lleva a cabo comprobando el grado de acuerdo entre los datos arrojados por el modelo y los datos del sistema real.

c) Análisis de sensibilidad: su misión es comprobar la estabilidad del modelo (o su comportamiento predictivo), examinando la variación que se produce en los resultados cuando se realizan variaciones sistemáticas en un rango de interés sobre uno o varios parámetros de entrada. Los resultados nos indicarán qué partes del modelo habrá que seguir perfeccionando en las siguientes versiones del mismo.

Vo Bo. Dr. José Aguilar



En relación a la Verificación del modelo propuesto, se puede afirmar que ya que esta es una propuesta metodológica, como parte de una tesis doctoral, y que ha pasado por diferentes revisiones, tanto por parte del autor como por parte del tutor, e igualmente por parte de un jurado revisor, esta correctamente construido, por supuesto que, esta sujeto a mejoras que propongan otros investigadores, mejoras que pueden ser incorporadas al mismo. En cuanto a la validación del modelo, se discute en la última parte de éste capítulo.

En cuanto al análisis de sensibilidad del modelo, como se dice anteriormente, se refiere a cómo cambian los resultados (las cuatro coberturas a, b, c, y d) al cambiar la información de entrada. Según Gomez y Barredo (2006) este tipo de análisis de sensibilidad (*What if?*) fue popularizado por los Sistemas Interactivos de Ayuda a la Decisión (SIAD). Unos se basan en los datos y otros se refieren a los modelos (de decisión). Lo más habitual es realizar un análisis del primer tipo (es decir, basado en los datos), con el fin de responder preguntas como:

- ¿Cambiará la ordenación si cambiamos los pesos?
- ¿Podemos encontrar los subconjuntos de criterios que permitan la obtención de las zonas de Pareto?
- ¿Entre que límites pueden variar los parámetros sin que se afecte la ordenación final?
- ¿Podemos obtener zonas de parámetros que dejen intacto el resultado final?

Los métodos más empleados se han centrado, tradicionalmente, en la simulación de diferentes escenarios en los que se introducen algún tipo de variación sobre los pesos otorgados a los factores, o sobre la "importancia que se les asigna". Según Saltelli et al (2000), citado por Gómez y Barredo (2006), los métodos de análisis de sensibilidad se pueden agrupar en tres tipos:

**1.- Métodos Pantalla (*screening methods*):** su utilización es apropiada en aquellos modelos que necesitan una gran carga computacional para ser evaluados (normalmente porque el número de factores implicado es elevado). Mediante estos métodos podemos averiguar que factores son los responsables de la mayoría de la variabilidad de los resultados y ordenarlos según su incidencia en esa variabilidad.

**2.- Métodos locales:** Con estos métodos se obtiene el impacto local de los factores en el modelo, observando el efecto que produce en los resultados la variación de cada factor de entrada, mientras los demás permanecen constantes (procedimiento denominado OAT, *One-factor-At-a-Time*). El resultado es una serie de "curvas" (una para cada factor) que define la tasa de cambio en los resultados del modelo, relativa a la tasa de cambio en los factores de entrada. La variación de los parámetros de entrada suele realizarse dentro de un intervalo reducido de  $\pm 5\%$  (normalmente el mismo para todos) o en torno a un valor "nominal" (fijado previamente), de ahí el nombre de locales.

**3.- Métodos globales.** El objetivo es poder calcular la cantidad de incertidumbre en los resultados (predicciones) del modelo que es debida a la incertidumbre de cada uno de los factores de entrada. Es decir, mediante estos métodos no solo podemos averiguar si las variaciones en los factores de entrada están provocando variaciones significativas en los resultados, sino que además podemos averiguar en qué proporción.

Vo Bo. Dr. José Aguilar



En realidad esta clasificación podría reducirse a los dos últimos grupos, puesto que todos los métodos pantalla pueden considerarse locales o globales, dependiendo del tratamiento otorgado a los factores. Así mismo, cabría proponer otra agrupación en métodos cualitativos y cuantitativos, ya que mientras los métodos pantalla solo nos indican cuales son los factores decisivos en el modelo analizado y los ordena en función de su influencia en la variación de los resultados, los métodos locales y globales nos permiten averiguar en que proporción lo hacen (Gomez y Barreda (2006))

De acuerdo a lo anterior, se propone entonces lo siguiente para conocer la sensibilidad y estabilidad del modelo, en el entendido de que se aplica un método local. **Al cambiar los pesos de la importancia dada a cada criterio también pueden cambiar los resultados finales, ya que si cambian los terminos lingüísticos utilizados podemos modificar las sensibilidades finales. Igualmente, lo anterior permite experimentar con el riesgo en la decisión, esto es, de que la decisión tomada sea errónea o conduzca a medidas correctivas o de asignación de recursos equivocadas, como lo plantean Jiang e Eastman (2000). Obsérvese a continuación un ejemplo de lo anterior.**

En el modelo inicial, para la "Importancia" de ambos criterios, se crearon los siguientes 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)

Y el resultado, los escenarios a, b, c, y d, fue el siguiente:

0,64	0,39	1,12	0,80	1,30	1,06	1,80	1,50
0,40	0,15	0,72	0,40	0,90	0,66	1,32	1,02
0,29	0,24	0,60	0,60	0,70	0,58	1,20	1,00
0,05	0	0,20	0	0,30	0,18	0,72	0,52

Como propuesta de análisis de sensibilidad del modelo y para experimentar con la estabilidad del mismo, se hacen los siguientes cambios. Se modifican los pesos asignados a la "importancia" de cada criterio, recordando un cambio de alrededor del 5 %, el peso de 0,7 dado a la importancia del factor "Tipo de costa" (incrementándole importancia) pasaria a ser 0,735, veamos que pasa si redondeamos a 0,8 (en este caso es aproximadamente un 14% de variación), por lo tanto el peso asignado al factor "Distancia a la orilla" pasaria a ser 0,2 (perdiendo importancia). **entonces cambian los terminos lingüísticos y por lo tanto los números difusos respectivos. Entonces, para la "Importancia" de ambos criterios se crean los siguientes números difusos:**

Criterio	Pesos	Términos lingüísticos	Números difusos
Tipo de costa	0,8	Extremadamente importante	(0,8 - 1 - 1 - 1)
Distancia a la orilla	0,2	Poco importante	(0,0 - 0,0 - 0,1 - 0,2)

Vo Bo. Dr. José Aguilar

Al hacer las operaciones respectivas se genera el siguiente resultado (ver tabla III.2).

0,64	0,24	0,9	0,5	1,1	0,71	1,2	0,90
0,64	0,24	0,9	0,5	1,02	0,72	1,04	0,74
0,08	0	0,25	0	0,35	0,11	0,42	0,22
0,08	0	0,25	0	0,27	0,12	0,48	0,28

a

b

c

d

**Tabla III.2.** Resultados con pesos de la “Importancia” de criterios modificados

Recordemos de nuevo que las cuatro coberturas finales (a, b, c, d) se interpretan de la siguiente forma:

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

Como se puede observar, todos los escenarios finales cambian, es lo esperado. El orden de las sensibilidades de la cobertura “a”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 0.64 para el Manglar cercano a la costa e igual para el Manglar lejano a la costa, 0,24 para el Estuario ceca y lejos de la costa, 0,08 para lo Urbano cerca y lejos de la costa, y valor “cero” para la sensibilidad de la costa arenosa.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “b”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 0,9 para el Manglar cerca de la costa e igual para el lejano a la costa, 0,5 tanto para el estuario cercano y lejano a la costa, 0,25 para la costa urbana cerca y lejos de la orilla, y, en este escenario la costa arenosa tampoco presenta sensibilidad

El orden de las sensibilidades de la cobertura “c”, de mayor a menor sensibilidad, es el siguiente: 1,1 para el Manglar cerca y 1,02 lejos de la costa, 0,71 para el Estuario cerca de la costa y 0,72 estuario lejano de la costa, 0,35 para la costa urbana cerca y 0,27 urbano lejos de la orilla, y 0,11 para la costa arenosa cerca y 0,12 lejos de la orilla. Como se puede observar en ésta cobertura la costa arenosa comienza a presentar valor en su sensibilidad.

El orden de las sensibilidades de la cobertura “d” (los mayores valores), de mayor a menor, es el siguiente: 1,2 para el manglar cercano a la costa, 1,04 para el manglar lejano a la costa, 0,9 para el Estuario cerca de la costa, 0,74 para el Estuario lejos de la costa, 0,42 para lo urbano cerca de lo costa, 0,48 para lo urbano lejos de la costa, 0,22 para la costa arenosa cerca de la costa, y, por ultimo, 0,28 para la costa arenosa lejos de la costa.

Comparando solamente los dos escenarios finales “d”, se detecta lo siguiente:

Vo Bo. Dr. José Aguilar



1,80 1,32	1,50 1,02	1,2 0,74	1,0 0,52
1,20 0,72	1,00 0,52	0,42 0,48	0,22 0,28

Escenario "d" Original      Escenario "d" con cambios

En general los valores finales de las sensibilidades cambian, disminuyendo, y en algunos caso cambiando su ordenación. En el modelo original resulto la siguiente ordenacion de 1ro) 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), 2do) le sigue el Ecosistema estuarino cerca de la orilla (1,5), 3ro) el manglar entre 40 y 100 m costa adentro (1,32), 4to) la costa urbana cerca de la orilla (1,2), 5to) el estuario costa adentro (1,02), 6to) la playa arenosa cerca de la orilla (1,0), 7mo) la costa urbana lejos de la orilla (0,72), 8vo) la playa arenosa lejos de la orilla (0,52).

En el modelo con cambios en sus valores de entrada, se obtiene el siguiente orden: 1ro) 1,2 para el manglar cercano a la costa (34 % de variación en su sensibilidad y se mantiene en el mismo lugar), 2do) 1,04 para el manglar lejano a la costa (estaba en 3er lugar), 3ro) 0,9 para el Estuario cerca de la costa (estaba de 2do), 4to) 0,74 para el Estuario lejos de la costa (estaba de 5to), 5to) 0,42 para lo urbano cerca de lo costa (estaba de 4to), 6to) 0,48 para lo urbano lejos de la costa (estaba de 7mo), 7mo) 0,22 para la costa arenosa cerca de la costa (estaba de 6to), y 8vo) , por último, 0,28 para la costa arenosa lejos de la costa (se mantiene igual).

Se puede observar que al cambiar los valores de entrada en el modelo de la "Importancia" de los dos criterios, podemos cambiar los resultados finales, y de ésta forma nos permite evaluar su estabilidad. Igual sucedería al cambiar los valores de los pesos asignados por los expertos a los "Tipos de costa", e igualmente al cambiar los pesos asignados a las diferentes distancias a la orilla del criterio "Distancia a la orilla". Es cuestión de determinar qué valores o porcentajes de cambio permiten responder las preguntas planteadas por Gomez y Barredo (2006):

- ¿Cambiaría la ordenación si cambiamos los pesos?
- ¿Cómo cambiaría la solución óptima si variamos los parámetros más importantes del modelo?
- ¿Entre qué límites pueden variar los parámetros sin que se afecte la ordenación final?
- ¿Podemos obtener zonas de parámetros que dejen intacto el resultado final?

Experimentando con los valores de entrada podemos responder las anteriores interrogantes

Vo Bo. Dr. José Aguilar



- Validación del modelo final propuesto

En relación a la validación del modelo final propuesto, se puede decir que, en este caso, se identifican limitantes para lograr tal objetivo, si aceptamos que el mismo es "comprobar el grado de acuerdo entre los datos arrojados por el modelo y los datos del sistema real". Entre las razones para afirmar lo anterior, se tienen las siguientes:

- 1.- existe una limitante de peso que restringe recorrer el área de estudio, la cual es su magnitud o extensión de la misma. Igual que para el reconocimiento y diagnóstico, para intentar validar el modelo se debería hacer un recorrido de la misma, la línea de costa, lo que fue imposible realizar por la falta de medios y logística para tal fin, a pesar de que se le ofreció el presente proyecto de investigación a diferentes instituciones y entes relacionados al manejo y gestión de la cuenca del Lago de Maracaibo.
- 2.- el recorrido de la línea de costa pudiera hacerse con medios de transportes terrestres, acuáticos y aéreos, la falta de recursos económicos para tal fin no permitió tal tarea.
- 3.- el hecho de que las sensibilidades finales son producto de la opinión de expertos, y en algunos casos del autor, siempre habrá una carga de subjetividad en el resultado final, por lo tanto, la única manera de reconocer validez en el resultado, la mayor o menor sensibilidad de un tipo de costa, es reconocer también la experiencia, los criterios y argumentos utilizados por cada experto o el mismo autor para la ponderación asignada.
- 4.- para el modelo finalmente propuesto, la característica innovadora es la generación de escenarios, o diferentes situaciones de sensibilidad, para de ésta manera escoger el que mejor representa la posición o interés del actor que hace tal selección, por lo tanto, sería poco práctico pretender validar el modelo, ya que lo que es de interés de un actor o sector puede no ser lo mismo para otro.

Las ventajas del modelo en si mismo son, primero, la generación de tales escenarios, y segundo, que representa un intento de conciliación entre las diferentes opiniones manifestadas en las encuestas, lo que resulta en una mejora en el proceso de toma de decisión cuando se deben seleccionar las medidas de protección y mitigación, al momento de acontecer un derrame petrolero.

Vo Bo. Dr. José Aguilar

