INFORME FINAL

(16/11/2007)

ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SITIOS AMBIENTALMENTE SENSIBLES A LOS EFECTOS POR DERRAMES DE HIDROCARBUROS

Número de contrato INE/A1-009/2007

Coordinadora institucional: Dra. Ania Mendoza Cantú

Índice

Índice de tablas iv
Índice de figuras v
1. Resumen ejecutivo…….. 1
2. Introducción…….. 2
3. Justificación…….. 3
4. Objetivos…… 5
4.1. Objetivo general…….. 5
4.2. Objetivos particulares…… 5
5. Marco Conceptual…….. 6
5.1. Definiciones…… 6
5.2. Índices de sensibilidad ambiental…….. 9
5.3. Comportamiento y destino ambiental de los derrames…… 18
5.4. Especies afectadas por derrames……... 21
5.5. Causas de ocurrencia de derrames…… 22
6. Área de estudio …….. 25
6.1. Características del medio físico y biológico…….. 25
6.2. Características del medio socio-económico..…… 29
7. Alcances..…… 32
8. Metodología…….. 33
8.1. Validación de información..……..... 33
8.2. Elaboración de mapa de geosistemas…… 35
8.3. Trabajo de campo…….. 38
8.4. Procedimiento de análisis jerárquico…… 40
8.4.1. Categorías de vulnerabilidad…… 43
8.5.2. Aplicación del método AHP…… 51
9. Resultados……..... 53
9.1. Zonas prioritarias…… 53
9.2. Cambios en el uso del suelo en el área de estudio…….. 54
9.3. Descripción de los geosistemas…….. 55
9.3.1. Geosistemas tecnógeno industriales…….. 56
9.3.2. Geosistemas tecnógeno urbanos, urbano-rurales, rural-urbanos y rurales..... 58
9.3.3. Geosistemas tecnógeno hidráulicos..... 60
9.3.4. Geosistemas agrarios..... 60
9.3.5. Geosistemas mixtos..... 64
9.3.6. Geosistemas naturales y semitransformados terrestres..... 65
9.3.7. Geosistemas naturales y semitransformados transicionales..... 68
9.3.8. Geosistemas naturales y semitransformados marinos……... 72
9.4. Características del sistema de información geográfica…..…… 73
9.5. Matrices AHP…….. 74
9.6. Mapas de sensibilidad ambiental……..…. 77
9.7. Propuesta metodológica para la identificación de sitios ambientalmente sensibles a los efectos de derrames de hidrocarburos 78
9.8. Aplicación de un modelo de comportamiento……. 81

10. Discusión…… 82
11. Conclusiones…….. 92
12. Referencias bibliográficas……..... 94
13. Referencias cartogáficas …… 101
Anexo 1. Índices de sensibilidad ambiental (ISA)……..... 102
Anexo 2. Cartografía…… 105
Anexo 3. Listado de especies del área de estudio…… 118
Anexo 4. Mapa de recorrido de la visita de campo…… 123
Anexo 5. Uso del suelo…… 125
Anexo 6. Matrices del procedimiento de análisis jerárquico…… 158
Anexo 7. *Shapes* de información cartográfica…… 168
Anexo 8. Descripción detallada de geosistemas…… 171

Índice de tablas

Tabla 1. Información requerida para evaluar riesgo de acuerdo la NOM-SENER-2006…….. 27
Tabla 2. Pesos obtenidos por el AHP para las variables consideradas….. 84
Tabla 3. Pesos obtenidos por AHP para cada variable en cada geosistema y calificación final…….. 86
Tabla 4. Categorías de vulnerabilidad-sensibilidad IIII, IV y V y geosistemas que incluyen…….. 87
Tabla 5. Categorías de vulnerabilidad III, IV y V del medio físico y geosistemas que incluyen……. 87
Tabla 6. Categorías de vulnerabilidad III, IV y V del medio biológico y geosistemas que incluyen……. 87
Tabla 7. Categorías de vulnerabilidad III, IV y V del medio socioeconómico y geosistemas que incluyen……..... 87
Tabla 8. Superficie abarcada por categoría de vulnerabilidad en la zona de estudio ……. 95

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama general del destino del petróleo crudo derramado en un cuerpo de agua y los principales procesos que sufre……. 21
Figura 2. A) Derrame reciente de petróleo crudo ocurrido en la planicie aluvial en Tabasco y B) Chapopote de un derrame de petróleo crudo sepultado por sedimentos y materia orgánica……. 21
Figura 3. Factores que determinan el destino del petróleo crudo en el ambiente…..……... 22
Figura 4. Efectos de los derrames de hidrocarburos sobre la biota…….. 23
Figura 5. Observaciones de campo para evaluar la permeabilidad en suelos del área de estudio……... 45
Figura 6. Esquema del procedimiento de análisis jerárquico diseñado para el presente estudio……..….. 48
Figura 7. Diferenciación de los geosistemas……. 62
Figura 8. Mapa de geosistemas…..……. 64
Figura 9. Plantación de hule cerca de las localidades de Plan de la Ceiba y Francisco de Garay……..……. 71
Figura 10. Planicie fluvio-lacustre en el Municipio de Agua Dulce……. 76
Figura 11. Destrucción de dunas para la construcción de asentamientos humanos en Coatzacoalcos……..……. 78
Figura 12. Síntesis de la metodología propuesta ……. 90
Figura 13. Gráfica del porcentaje de superficie estudiada por categoría de vulnerabilidad ……. 98

1. Resumen ejecutivo

En México la industria petrolera cuenta con una amplia red de infraestructura para la distribución de productos petroleros que se extiende a lo largo del país y que atraviesa importantes zonas urbanas, industriales, agropecuarias y naturales, las cuales pueden estar sujetas a fugas y derrames. Estos incidentes pueden constituir un posible peligro para los ecosistemas y las actividades económicas. Ante esta problemática, el Instituto Nacional de Ecología inicio en 2007 un proyecto de investigación con la finalidad de desarrollar una metodología para identificar sitios ambientalmente sensibles a estos eventos.

Como primera etapa de este proyecto, se desarrolló la propuesta de dicha metodología a través de un estudio piloto en la región de Coatzacoalcos, Veracruz. En esta propuesta se plantea evaluar la sensibilidad ambiental como una función que relaciona una problemática, en este caso los derrames de petróleo crudo de ductos, con la vulnerabilidad de una zona; definiendo esta última a través de las características intrínsecas que le confieren susceptibilidad ante las alteraciones provocadas por los derrames. La vulnerabilidad se evaluó con base en el comportamiento esperado de los derrames en zonas terrestres y en zonas bajo la influencia del agua, considerando además las características físicas, biológicas y socioeconómicas de cada área. Como producto principal de este estudio se elaboró un mapa de sensibilidad ambiental, mediante un sistema de información geográfica, en el cual se pueden ubicar los sitios con diferentes grados de vulnerabilidad en esta región.

Los resultados obtenidos del estudio piloto mostraron la utilidad de las variables propuestas para diferencias las zonas sensibles en el área de estudio. Sin embargo, para extender la aplicación de esta metodología a otras regiones del país, en necesario evaluar primero su valor predictivo con relación a la vulnerabilidad real de los ecosistemas a una escala menor y con relación al destino ambiental de los hidrocarburos en áreas con niveles de vulnerabilidad

diferente. Asimismo, es necesario ampliar, en la medida que la información disponible lo permita, la caracterización de los ductos que atraviesan las zonas sensibles ya identificadas.

El desarrollo de esta metodología promoverá el establecimiento de acciones preventivas y de atención rápida a los derrames de hidrocarburos por parte de las autoridades ambientales y de atención a emergencias.

2. Introducción

El petróleo y sus derivados son mezclas complejas de hidrocarburos, que contienen varios miles de compuestos orgánicos. Cuando los hidrocarburos son liberados (a través de derrames y fugas accidentales) al ambiente, pueden causar problemas debido a su toxicidad, movilidad y persistencia. Estos compuestos pueden representar distintos tipos de riesgos, además de las explosiones e incendios; debido a su reactividad química y su toxicidad. Las fracciones ligeras presentan una alta movilidad y pueden ser transportadas a grandes distancias, tanto en el suelo como en el agua subterránea. Por el contrario, los hidrocarburos pesados pueden persistir por años en el suelo y los sedimentos, creando problemas estéticos en el paisaje, olores desagradables, apariencia degradada y mal sabor en los productos cultivados en terrenos contaminados. La calidad del suelo puede deteriorarse como resultado de la contaminación con hidrocarburos, lo cual interfiere con varias de sus funciones en los ecosistemas, como por ejemplo en la retención de agua y el flujo de nutrientes. El contacto directo de los organismos con los hidrocarburos puede tener consecuencias a distintos niveles. A nivel individual estos compuestos pueden producir alteraciones bioquímicas o fisiológicas significativas o incluso la muerte en los organismos expuestos. Por su parte, a nivel poblacional pueden producir cambios importantes en la abundancia, distribución y diversidad de las comunidades y ecosistemas afectados.

En México, debido a la importancia del petróleo como recurso natural, Petróleos

Mexicanos (PEMEX) ha construido una extensa red de infraestructura para su conducción. Las redes de ductos se extienden por amplias regiones del país, sobre todo en los estados del sureste, incluyendo Veracruz, Tabasco y Campeche. La presencia de estas instalaciones en estas zonas representa un peligro, debido a los posibles derrames de hidrocarburos que pueden impactar negativamente los ecosistemas y localidades aledañas.

En un periodo de 4 años (1997-2001) la PROFEPA registró 1675 emergencias distribuidas de manera diferencial en nuestro país; sin embargo, a nivel estatal, Veracruz ocupó el primer lugar del país por el número de accidentes derivados de la industria petrolera, con 502 casos (29.9%), Campeche con 419 y Tabasco con 391. Los tres estados suman cerca del 80% de los accidentes a nivel nacional. La mayoría de estos accidentes se relaciona con la forma de transporte de fluidos (petróleo crudo, gasolinas, diesel, gas licuado, gas natural y productos petroquímicos) que se realiza a través de ductos y por vías marítima y carretera. Se tiene conocimiento de que los ductos registran el mayor número de contingencias debido principalmente a las tomas clandestinas, la corrosión y el golpe mecánico (Olivera y Rodríguez, 2005; Olivera, 2006). Es importante señalar que en ciertos casos no se conoce con exactitud el trazo de los ductos, registrándose errores en su trayectoria que pueden ser de 15 metros y más (Hernández, 2006).

3. Justificación

En México la industria cuenta con una amplia red de infraestructura para la distribución y conducción de productos petroleros, que se distribuye a lo largo y ancho del país y que atraviesa importantes zonas urbanas, industriales, agropecuarias y naturales. Varios factores ambientales y humanos contribuyen a la ocurrencia de fugas y derrames de estos compuestos en muchas regiones del país, sobre todo en el sureste de México dónde se encuentra concentrada la mayor producción de petróleo. Estos incidentes constituyen un posible peligro para

el ambiente, la salud humana y las actividades económicas.

Ante esta problemática, es sumamente atinada e importante la decisión de elaborar un programa de investigación de gran visión, temporal y territorial que permita conceptualizar el problema a escala nacional y detallar su análisis a escalas locales, mediante la implementación de estudios piloto que posibiliten desarrollar, además del marco conceptual a utilizar, las herramientas metodológicas (categorías de análisis, variables, parámetros e indicadores aplicables en diversos ambientes) y el desarrollo tecnológico de apoyo (sistema de información geográfica diseñado específicamente para la prevención de este tipo de peligro), requeridos para la adecuada gestión de riesgos por derrames de hidrocarburos.

Un proyecto de gran visión como el indicado permitirá que, mediante el sistema de información geográfica, se puedan ubicar con precisión las zonas más vulnerables por posibles derrames. Aunado a esto, la propuesta metodológica permitirá identificar, caracterizar, jerarquizar y evaluar los sitios ambientalmente sensibles, así como responder a preguntas complejas que contribuyan a prevenir y atender emergencias de este tipo de manera oportuna y eficiente. Entre tales preguntas se incluyen las siguientes:

i) Aquellas relacionadas con las estimaciones sobre la probabilidad de que sucedan derrames (¿cuáles son las causas principales de que sucedan derrames? ¿cómo calcular la probabilidad de que sucedan? ¿qué zonas afectarían? ¿cuál sería el impacto ambiental, social y económico? ¿cómo se podría minimizar el riesgo? y ¿cómo podrían atenderse estos eventos?).

ii) Aquellas relacionadas con la evaluación de la sensibilidad ambiental, aspecto que implica la delimitación de unidades ambientales homogéneas en cuanto al medio físico y la condición de los ecosistemas (geosistemas), para poder definir en qué unidades los efectos de los derrames son mayores o más graves (criterios de jerarquización). Esto puede evaluarse de distintas maneras; como por ejemplo a través de: 1) efectos inmediatos derivados del

derrame (pérdida de vegetación, recubrimiento del suelo, etc.), 2) efectos ecotoxicológicos provocados por los compuestos derramados sobre las especies expuestas, 3) movilidad de los compuestos en el ambiente, que implica la evaluación de parámetros que determinan el transporte y dispersión de los hidrocarburos y 4) persistencia de los compuestos.

iii) Aquellas relacionadas con el análisis del riesgo y de sus impactos en la población (¿cuáles son los posibles efectos a la salud? ¿cuáles son los posibles efectos económicos por daño a las actividades humanas o a sus bienes?).

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Generar una propuesta metodológica para la identificación de sitios ambientalmente sensibles a la ocurrencia de derrames de hidrocarburos (petróleo crudo) a partir de oleoductos.

4.2. Objetivos particulares

1. Identificar sitios prioritarios (a escala nacional) con base en su peligro-vulnerabilidad ante derrames de petróleo crudo.
2. Seleccionar una zona de estudio, elegida de mutuo acuerdo, para generar la propuesta metodológica.
3. Proponer variables para:
   a) evaluar la probabilidad de que suceda un derrame en los ductos.
   b) determinar sensibilidad ambiental y su jerarquización.
   c) analizar la posibilidad de que se vea afectada la población.
4. Integrar la información cartográfica básica disponible en formato digital.
5. Generar, con el apoyo de un sistema de información geográfica, cartografía temática de vulnerabilidad o sensibilidad ambiental frente a derrames de

hidrocarburos en la zona de estudio.

6. Identificar y proponer las variables clave para la evaluación de la sensibilidad ambiental de los diferentes geosistemas del área de estudio.

5. Marco conceptual

5.1. Definiciones

Con el fin de analizar las zonas de mayor riesgo por posibles derrames de hidrocarburos e identificar los sitios potencialmente sensibles a los efectos de dichos derrames es necesario establecer un marco conceptual. Al respecto, cabe mencionar que existen numerosas definiciones de la terminología relativa a los estudios de riesgo, según las orientaciones o intereses de los diversos sectores científicos y de la sociedad en general. Asimismo, como señala Wilches-Chaux (1993), muchas de ellas son contradictorias entre sí; sin embargo, no es objetivo de este trabajo el analizarlas, sino seleccionar las definiciones más pertinentes.

En el consenso internacional de las investigaciones sobre riesgos, los dos componentes principales son el peligro y la vulnerabilidad y las fórmulas que se manejan con más frecuencia son las siguientes:

Riesgo = Peligro x Vulnerabilidad o Riesgo = *f*(Peligro, Vulnerabilidad)

Donde: *f* es una función que depende del problema analizado

La primera fórmula se utiliza en situaciones en las cuales el peligro y la vulnerabilidad tienen magnitudes conocidas, o existen indicadores claros para evaluarlos, como por ejemplo el riesgo frente a terremotos, en dónde el peligro se mide con valores de magnitud, intensidad y aceleración y los indicadores de vulnerabilidad de la población se cuantifican a través de la densidad, estructura e ingresos de la población.

En el caso de la segunda fórmula no se conocen estos valores o indicadores porque varían de acuerdo a las circunstancias específicas del fenómeno estudiado y es necesario establecerlas caso por caso. Este aplica a los derrames de hidrocarburos, por ello en este estudio se utilizará esta fórmula, ya que es necesario desarrollar indicadores específicos para evaluar el peligro y la vulnerabilidad.

Concepto de peligro

Un peligro se define como la ocurrencia de un evento con cierto grado de severidad en términos de sus características, dimensión, y ubicación geográfica; así como su potencialidad (se refiere a la posibilidad o probabilidad de ocurrir, como causante de daño) (Cardona, 1993).

De acuerdo a Murck y colaboradores (1997), en las evaluaciones del peligro es necesario realizar varias tareas importantes que consisten en determinar:

- Dónde y cuándo han ocurrido eventos peligrosos
- Los efectos de los eventos peligrosos que ocurrieron, en términos de una magnitud o tamaño dado
- Con qué frecuencia se pueden esperar eventos lo suficientemente fuertes como para generar impactos severos
- De qué manera un evento peligroso puede afectar al ambiente y a la población si ocurriera en un momento específico
- Expresar gráficamente (mapas) toda la información anterior de manera que pueda ser usada por los planificadores y tomadores de decisión

En este estudio, el peligro se refiere a los derrames de petróleo crudo de ductos, fenómeno de origen tecnológico o físicoquímico que puede impactar negativamente al ambiente y afectar a la población humana. El peligro se puede calcular en términos de probabilidad si se cuenta con datos de la frecuencia histórica de estos fenómenos en un determinado lugar. Algunos autores manejan

definen el término peligro como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado (Undro, 1979 en Cardona, 1993).

Concepto de vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad se utiliza en numerosos ámbitos y en diferentes niveles espaciales; tiene tantos significados como especialistas los han determinado, lo cual genera conflictos, sobre todo cuando se trata de clasificar los diversos componentes o factores de vulnerabilidad. Es frecuente encontrar términos como sensibilidad, resistencia, resiliencia, marginalidad y fragilidad para referirse a la vulnerabilidad (Wei *et al*., 2004), además de susceptibilidad, debilidad y capacidad de amortiguación. En otras ocasiones, estos mismos términos se diferencian entre sí.

En el contexto de la contaminación de suelos la vulnerabilidad "*representa el grado de sensibilidad del suelo frente a la agresión de los agentes contaminantes. Este concepto está relacionado con la capacidad de amortiguación. A mayor capacidad de amortiguación, menor vulnerabilidad. El grado de vulnerabilidad de un suelo frente a la contaminación depende de la intensidad de afectación, del tiempo que debe transcurrir para que los efectos indeseables se manifiesten en las propiedades físicas y químicas de un suelo y de la velocidad con que se producen los cambios secuenciales en las propiedades de los suelos en respuesta al impacto de los contaminantes*" (Cardona, 1993).

Desde la perspectiva socioeconómica, la vulnerabilidad se reconoce como la susceptibilidad de sufrir un daño (fragilidad) y tener dificultad de recuperarse de ello. En otras palabras, indica qué tan propenso es un sistema a los daños que pueda causar el impacto de un fenómeno destructivo (Undro, 1979, en Cardona, 1993). Esta definición es la que se manejará en este estudio, ya que también se puede aplicar al medio biofísico.

Es frecuente diferenciar dos tipos de vulnerabilidad, una intrínseca y otra específica. La primera se refiere a un rasgo propio o inherente dado por las características o propiedades físico-biológicas y sociales de un sistema. Desde este punto de vista, la vulnerabilidad es muy variable entre ecosistemas o geosistemas. Por su parte, la vulnerabilidad específica se relaciona con las afectaciones de una o varias influencias externas (peligros). Por ejemplo, en geosistemas lagunares los daños por derrames pueden ser irreversibles debido al grado de impacto que puedan sufrir de acuerdo al tipo de hidrocarburo, al volumen derramado, al tiempo de permanencia, entre otros aspectos que son “ajenos” a las lagunas. Se reconocen dos conceptos:

- Vulnerabilidad intrínseca o natural: representa las propiedades naturales del terreno, y no considera las propiedades de los contaminantes particulares.
- Vulnerabilidad específica: evalúa contaminantes concretos o grupos que se comportan de forma igual o similar.
-

Conceptos de riesgo y sensibilidad ambiental

El riesgo se define como la estimación cualitativa o cuantitativa del daño potencial a la sociedad y al ambiente. Este concepto se considera equivalente a la sensibilidad ambiental, de la cuál también existen múltiples definiciones; sin embargo, la que se considera más apropiada es la siguiente: la sensibilidad ambiental se refiere al potencial de afectación (transformación o deterioro) que pueden sufrir los componentes ambientales (vulnerabilidad), como resultado de la alteración de los procesos físicos, bióticos y socioeconómicos debido a las actividades de intervención antropogénica del medio o debido a los procesos de desestabilización natural que experimenta el ambiente (peligros) (Gutiérrez, 1990; definición modificada de Sandia y Roa).

5.2. Índices de sensibilidad ambiental

La sensibilidad-vulnerabilidad no es una característica de un objeto físico

susceptible de medición. Se le considera una cualidad que involucra necesariamente una percepción o juicio de valor. Esto le resta objetividad a los resultados emitidos y por tanto a las propuestas o decisiones que de ellos deriven. Los estudios y esfuerzos se han dirigido a subsanar este problema de la mejor manera posible.

Una alternativa muy recurrida es la construcción de índices (Marrull *et al*, 2006; NOAA, 2002; IMO/IPIECA, 1994). Un índice es el resultado de la integración de variables objetivamente cuantificables mediante una función "x". Las variables se seleccionan con base en las evidencias acumuladas o reportadas que afirman o prueban su relación con la sensibilidad-vulnerabilidad.

Esta afirmación plantea dos problemas a resolver:

- la selección de las variables apropiadas
- la selección de la función que las relaciona

Selección de variables

Conforme al Banco Mundial (World Bank, 2007), la selección de indicadores es un proceso delicado y se recomienda verificar que las variables reúnan ciertos requisitos para ser seleccionadas. En el caso de los estudios a escala regional-paisajística o menores se señalan las siguientes características para las variables:

- que se puedan monitorear a bajo costo (máxima información al menor tiempo, esfuerzo y costo posibles)
- que sean medibles (de manera objetiva)
- que representen tendencias significativas
- que señalen, lo más directamente posible, el estado de la biodiversidad en el área o el impacto que el proyecto tendrá sobre la biodiversidad
- que sean precisas y no-ambiguas, para que sean claramente definidas y entendidas de igual manera por diferentes actores
- que permitan identificar (y diferenciar) efectos de procesos sincrónicos, tales

como climáticos, eventos catastróficos y variaciones naturales

- que estén dirigidas a evaluar las condiciones específicas del estudio
- que sean susceptibles de muestreo-evaluación por no-especialistas, incluyendo a los usuarios o comunidades locales (sugiriéndose que los indicadores debieran tener sentido para los habitantes locales)
- que sean consistentes (que sigan midiendo lo mismo a lo largo del tiempo)
- que sean consistentes con (o las mismas que) aquellas usadas a nivel nacional y las usadas para evaluar las áreas protegidas
- que requieran la participación del mínimo número posible de individuos y agencias para su evaluación.

Lograr que las variables reunieran todos estos requisitos fue difícil; sin embargo, en el presenté estudio se buscó que siguieran el mayor número posible de estos lineamientos. Asimismo, debido a la naturaleza de este trabajo, se pudieron identificar requisitos adicionales para las variables, los cuales incluyen específicamente:

- que estuvieran disponibles (que existan datos al respecto)
- que fueran cartografiables (capaces de ser ubicados y representados en un mapa en forma de polígonos)
- que fueran apropiadas a la escala de trabajo

Estas últimas condiciones redujeron el número de fuentes de información potencialmente utilizables.

Selección de la función

Otra limitante que surgió en el presente trabajo fue la dificultad de identificar la función que define nuestro objeto de estudio, ya que las relaciones causa-efecto entre las variables y la sensibilidad ambiental son difíciles de establecer o son aún desconocidas. Por ello, este estudio, como la mayoría de los enfocados a definir sensibilidad-vulnerabilidad, adolece inevitablemente de una buena dosis de

incertidumbre con relación a la conveniencia del conjunto de variables seleccionadas (en términos de incluir todas y las mejores variables que definen esta cualidad).

En este tipo de estudio, las relaciones se van validando mediante el uso de modelos predictivos, que luego se contrastan contra casos reales que, a su vez, retroalimentan el modelo. De esta manera se establece un proceso iterativo de ajustes continuos. El caso de la sensiblidad-vulnerabilidad ambiental ante derrames de petróleo es tan solo un caso particular de esta problemática general. Por lo que para la selección de variables a incorporar, se recurrió a una intensa revisión bibliográfica (Adler and Invar, 2007; AlMaleck and Mohamed, 2005; Almasri, 2007; CENAPRED, 2006; Iturbe *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2006; Marull *et al.*, 2006; Molloul and Wollman, 2003; Metzger *et al.*, 2006; Metzger *et al.*, 2005; Morales-Caselles *et al.*, 2007; NOAA, 2002; Seip *et al.*, 1991; Wei *et al.*, 2004; Worrall *et al.,* 2002).

Los índices de sensibilidad ambiental propuestos por la Nacional Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2002) constituyen la propuesta más acabada, la cual se basa en el análisis de una serie de casos específicos de derrames de petróleo que esta organización ha atendido y que ha ido adaptando y, a la vez, generalizando.

Considerando que en nuestro país la información sobre derrames de hidrocarburos no se recaba y analiza sistemáticamente y que no se cuenta con bancos de datos al respecto, o si estos existen no están a disposición del público para consulta, o están fragmentados e incompletos, se optó por adoptar (en la medida de lo posible) las variables que propone la NOAA.

Los Índices de Sensibilidad Ambiental (ISA) que propone la NOAA se basan en la experiencia de esta institución en la atención de derrames de petróleo en medios marinos, lo que no se adapta exactamente al presente estudio de derrames terrestres por fugas de ductos; sin embargo, proporcionan los elementos que

deberán tomarse en cuenta en estudios de este tipo. En el anexo 1 se presenta un resumen de los ISA.

De acuerdo a este esquema, la jerarquización de la sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos (aunque bastante específico para ambientes costeros), está controlada por los siguientes factores:

- Exposición relativa a la energía del oleaje y de mareas
- Pendiente de la playa
- Tipo de sustrato (tamaño de grano, movilidad, penetración o enterramiento, y traficabilidad)
- Sensibilidad y productividad biológica

Exposición relativa a la energía del oleaje y de mareas

A partir de grandes derrames se ha podido establecer que la magnitud del impacto depende del grado relativo de exposición del hábitat impactado. Dos factores físicos, el flujo de energía de las olas y el flujo de energía de las mareas, también llamados nivel de energía hidrodinámica en las costas, determinan el grado de exposición.

La energía de las olas se establece por la altura media de las olas, medida por un año al menos. Donde las olas son típicamente altas (alturas frecuentes mayores a 1 m) el impacto de los derrames en el hábitat se reduce porque:

- las corrientes mar adentro, que se generan por la energía de la resaca de la ola habiendo chocado contra una superficie dura, arrastran el petroleo lejos de la costa.
- las corrientes generadas por las olas mezclan y retrabajan los sedimentos costeros, que son típicamente de grano grueso en estos escenarios, removiendo rápidamente el petroleo.
- los organismos adaptados a vivir en esos ambientes están acostumbrados a perturbaciones de corto plazo en el ambiente.

La energía de flujo de las mareas también es importante, aunque no tanto. La consideración más relevante es el potencial que tienen las fuertes corrientes de marea para remover el petróleo y la de construir y mover barras intermareales de arena o grava, las cuales podrían enterrar el hidrocarburo. Los sustratos altamente móviles por las mareas contienen menos fauna que los sustratos más estables. Las corrientes dependen de la anchura de la franja intermareal.

Estas dos fuerzas se combinan para producir un continuo de energía a lo largo de la línea de costa, que para poder ser mapeado deben seccionarse áreas de energía alta, media o baja. Alta energía quiere decir remoción natural rápida, en lapsos de días o semanas; baja energía significa remoción por vía natural, lenta, en lapsos de años; y energía media implica que el derrame será limpiado al presentarse el próximo evento de alta energía, lo que tomará días o meses. Las costas que no pueden ser predichas (sin patrón estacional) son difíciles de caracterizar y potencialmente pueden presentar una larga persistencia del hidrocarburo.

Pendiente de la playa

La pendiente de la playa mide la inclinación de la zona intermareal, entre marea máxima y mínima. Los criterios de la NOAA (2002) para esta variable son:

- Pendiente escarpada: > 30º
- Pendiente moderada: entre 30 y 50º
- Pendiente plana: < 5º

La importancia de la pendiente es su efecto sobre la reflexión y rompimiento de las olas. Las pendientes escarpadas tienen entrada abrupta, ruptura de olas y, a veces, fuerte resaca que promueve la limpieza. Por su parte, las zonas intermareales planas promueven la disipación de la energía de las olas y el hidrocarburo perdura por más tiempo en ellas. Las franjas intermareales anchas poseen también comunidades biológicas en áreas extendidas (camas de

cangrejos, ostras o comunidades vegetales). En hábitats físicamente protegidos, la pendiente no importa tanto. En ellas es frecuente que las comunidades biológicas tengan más área de desarrollo.

Tipo de sustrato

De acuerdo a su tipo, los sustratos se clasifican en:

- Roca consolidada, que puede ser permeable o impermeable, dependiendo de la presencia de depósitos sobrepuestos a la roca.
- Sedimentos, que se dividen por tamaño de grano. La escala sugerida por NOAA (2002) es la siguiente:
  - Lodo: limos y arcillas (< 0.06 mm de diámetro)
  - Arenas finas a medias (de 0.06 a 1mm)
  - Arena gruesa (1 a 2 mm)
  - Fracciones más gruesas con tamaños dominantes en intervalos de:
    - 2 a 4 mm
    - 4 a 64 mm
    - 64 a 256 mm
    - > 256 mm
- Materiales agregados por el hombre, los cuales pueden ser:
  - Escolleras (Riprap) o roca triturada de varios tamaños permeable a la penetración de hidrocarburos (aceites)
  - Muros marinos de material sólido (concreto o acero) impermeables a los hidrocarburos (aceites)

En sustratos no consolidados existe el potencial para la penetración o enterramiento de los hidrocarburos (aceites); ambos procesos contribuyen a la persistencia del mismo, implican impactos biológicos a largo plazo y hacen más difícil y drástica la limpieza.

La penetración se da cuando el hidrocarburo queda estancado en la superficie de

sedimentos permeables; la profundidad de penetración es controlada por el tamaño de grano del sustrato, a la vez que el intervalo de tamaños de grano de los sedimentos. La penetración mayor se observa para sedimentos gruesos (grava) con tamaño de grano muy uniforme. En estos casos el hidrocarburo llega a penetrar hasta 1 m. En sedimentos combinados grava-arena la penetración es menor (50 cm). Las playas arenosas también se clasifican por el tamaño de grano, variando su permeabilidad y la profundidad de penetración del hidrocarburo. Los sedimentos lodosos tienen la mínima permeabilidad y tienden a estar saturados de agua, en ellos la penetración es muy limitada. Los túneles o galerías producidos por la fauna pueden aumentar la penetración potencial de hidrocarburos.

El enterramiento se presenta cuando se depositan sedimentos limpios sobre capas de hidrocarburos. La velocidad del enterramiento varía mucho y puede ocurrir en tan sólo 6 horas (mitad de un ciclo de mareas). Los enterramientos rápidos ocurren en playas de arena gruesa, que tienen la mayor movilidad bajo condiciones de oleajes y mareas normales. Las tormentas pueden movilizar acumulaciones de grava o barras, enterrando el hidrocarburo en costas gravosas.
En costas con patrones estacionales de tormentas muy marcados puede haber ciclos de erosión/depositación en la playa y distribución de sedimentos. Estas playas tienen el más alto potencial de enterramiento, sobre todo si el hidrocarburo se derrama a principios del periodo de depósito.

Los depósitos humanos se identifican fácilmente por su apariencia antinatural. Hay que identificar primero las escolleras (riprap) ya que dificultan la respuesta y favorecen una alta persistencia de hidrocarburos.

El tipo de sustrato también influye sobre su “traficabilidad” o habilidad para maniobrar, tanto del personal como de la maquinaria durante una limpieza o atención. Las playas con alta traficabilidad se clasifican más bajo en la escala de sensibilidad que aquellas en las que las cuadrillas no podrán moverse fácilmente e incluso causarán un daño adicional. Las playas de arena fina normalmente están

compactadas y duras, éstas son un ejemplo de alta traficablilidad. Las playas de grano grueso tienden a tener pendientes de moderadas a fuertes, poco compactadas y con alta permeabilidad, son poco traficables. Las playas de grava son menos traficables, en ellas los vehículos promueven la penetración del derrame. Finalmente, los hábitats de humedales, con sus sustratos lodosos, tienen muy poca traficabilidad. No se puede usar equipo en ellos; cualquier implemento favorecerá la penetración del hidrocarburo, afectando plantas y fauna.

Productividad y sensibilidad biológica

Los hábitats con vegetación, como pantanos y manglares, tienen el valor más alto en la escala de sensibilidad por su potencial para impactos de largo plazo. La recuperación de los servicios ecológicos puede llevar décadas en los hábitats más productivos. En la escala de sensibilidad, a todas las playas de arena fina se les asigna un valor de 3 (en una escala de 1 a 10). A los planos de mareas se les da valor alto por la productividad béntica e importancia como sitios de alimentación para peces y aves. Otras particularidades como nidos de tortuga, no afectan el valor de la escala. La presencia estacional de otros recursos se señala mapeando recursos biológicos y humanos.

En función de estos conceptos, para el desarrollo de este trabajo se decidió centrar la atención sobre aquellas características del medio físico relacionadas a la energía y comportamiento de los ríos permanentes de la zona, en las características del medio físico que favorecen la dispersión o la penetración de los hidrocarburos y al valor e integridad de los recursos bióticos presentes en el área de estudio: Se consideró importante incluir también algunas variables socio-económicas que permitieran evaluar el potencial de daño a las personas y a sus bienes.

5.3. Comportamiento y destino ambiental de los derrames

El petróleo es una mezcla compleja constituida por hidrocarburos y otros compuestos que contienen nitrógeno, oxígeno y azufre. También contienen metales como vanadio y níquel (Lewan, 1984). Los hidrocarburos presentes se pueden dividir en dos grandes grupos: uno formado por compuestos cuya estructura contiene anillos bencénicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos o compuestos N-S-O aromáticos) y otro constituido por compuestos de cadenas lineares, ramificadas o secuencias circulares. Cada tipo de petróleo crudo contiene cientos de compuestos y ninguno es exactamente igual a otro. El petróleo normalmente se nombra de acuerdo a la localización geográfica del pozo de extracción, por ejemplo South Louisiana, Hibernia, Kuwait, Prudhoe Bay, Cantarel, Itsmo, Maya y Olmeca; sin embargo, estos nombres no dicen nada acerca de su composición química. Los tipos de petróleo crudo varían enormemente en su composición, aún el petróleo crudo de un mismo pozo puede variar en su composición química a través del tiempo.

Algunos aspectos de toxicidad del petróleo crudo dependen de su composición química. En los casos en los que se ha estudiado, se ha definido que la toxicidad está más bien asociada con los hidrocarburos aromáticos policíclicos. A este respecto, se identifica como la fracción más tóxica a la de los compuestos aromáticos más grandes, los cuales no son volátiles, presentan un alto peso molecular, son poco solubles en agua y son persistentes. Sin embargo, se sabe que los organismos acuáticos corren mayor riesgo cuando están expuestos a compuestos más pequeños, de bajo peso molecular y más solubles, ya que dichos compuestos alcanzan concentraciones más elevadas en el agua.

La composición química de un derrame de petróleo crudo empieza a cambiar inmediatamente después de estar expuesto a las condiciones del ambiente. Este proceso, llamado intemperismo, es continuo y en promedio se completa en aproximadamente un año en cuerpos de aguas templadas, pero puede requerir

mucho más tiempo en ambientes más fríos o cuando el petróleo crudo es sepultado por el sedimento o se infiltra en material poroso como la arena de playa (NOAA, 2002) o suelos orgánicos (Cram *et al*., 2004). El resultado final del petróleo crudo intemperizado derramado es la conversión del petróleo crudo original en hidrocarburos dispersos en el aire, agua y suelo y masas de asfalto residual o chapopote, que si se encuentran en el agua son arrojados a las playas o se hunden y son sepultados por los sedimentos.

Los procesos sucesivos que se llevan a cabo durante el intemperismo del petróleo son: la evaporación, la formación de emulsiones aceite-agua o agua-aceite, la dispersión de estas emulsiones, la disolución de compuestos solubles del petróleo crudo, la foto-oxidación de los compuestos expuestos a la radiación solar, la sedimentación y la degradación microbiana (EPA, 1999) (figura 1). En cualquier punto del proceso el petróleo crudo puede quedar ocluido o sepultado y la intemperización se suspende hasta que vuelva a quedar expuesto por remoción del suelo o sedimento (figura 2). Se reconoce que el agua permite una mayor dispersión del petróleo crudo y que el suelo y el sedimento restringen su movilidad por procesos de sorción o entrapamiento y por degradación (figura 3).

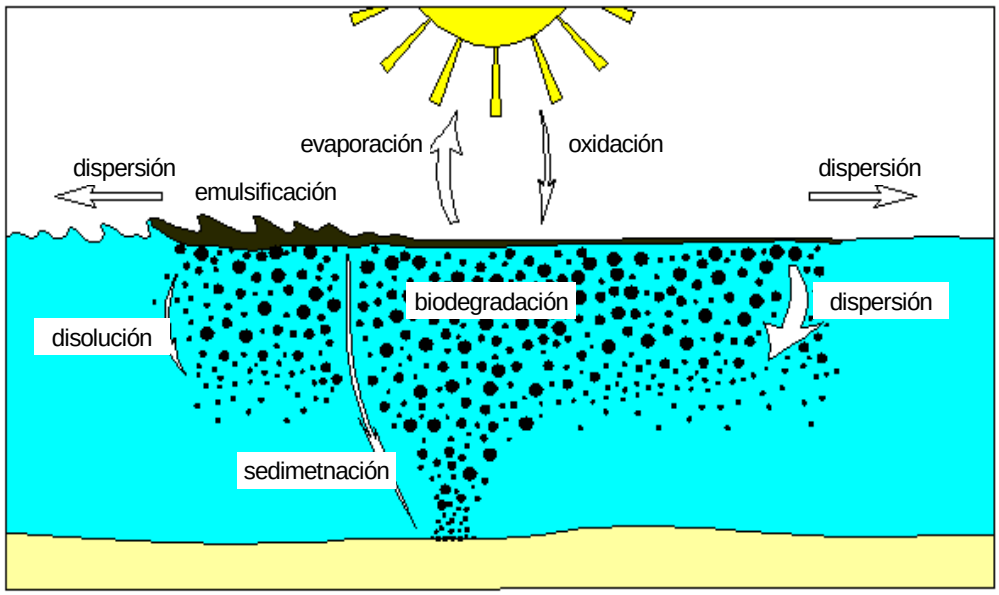

Figura 1. Diagrama general del destino del petróleo crudo derramado en un cuerpo de agua y los principales procesos que sufre.

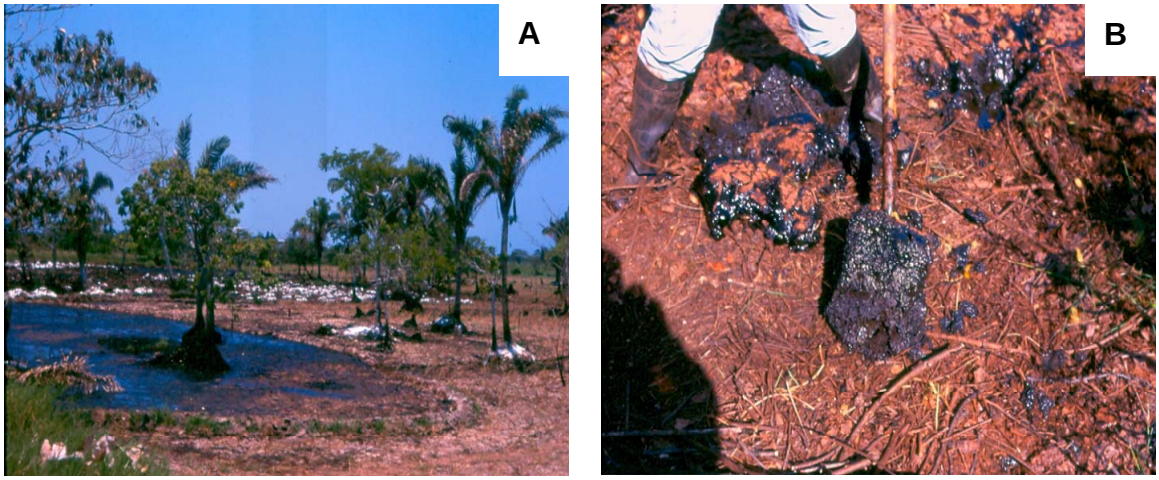

Figura 2. A) Derrame reciente de petróleo crudo ocurrido en la planicie aluvial en Tabasco y B) Chapopote de un derrame de petróleo crudo sepultado por sedimentos y materia orgánica.

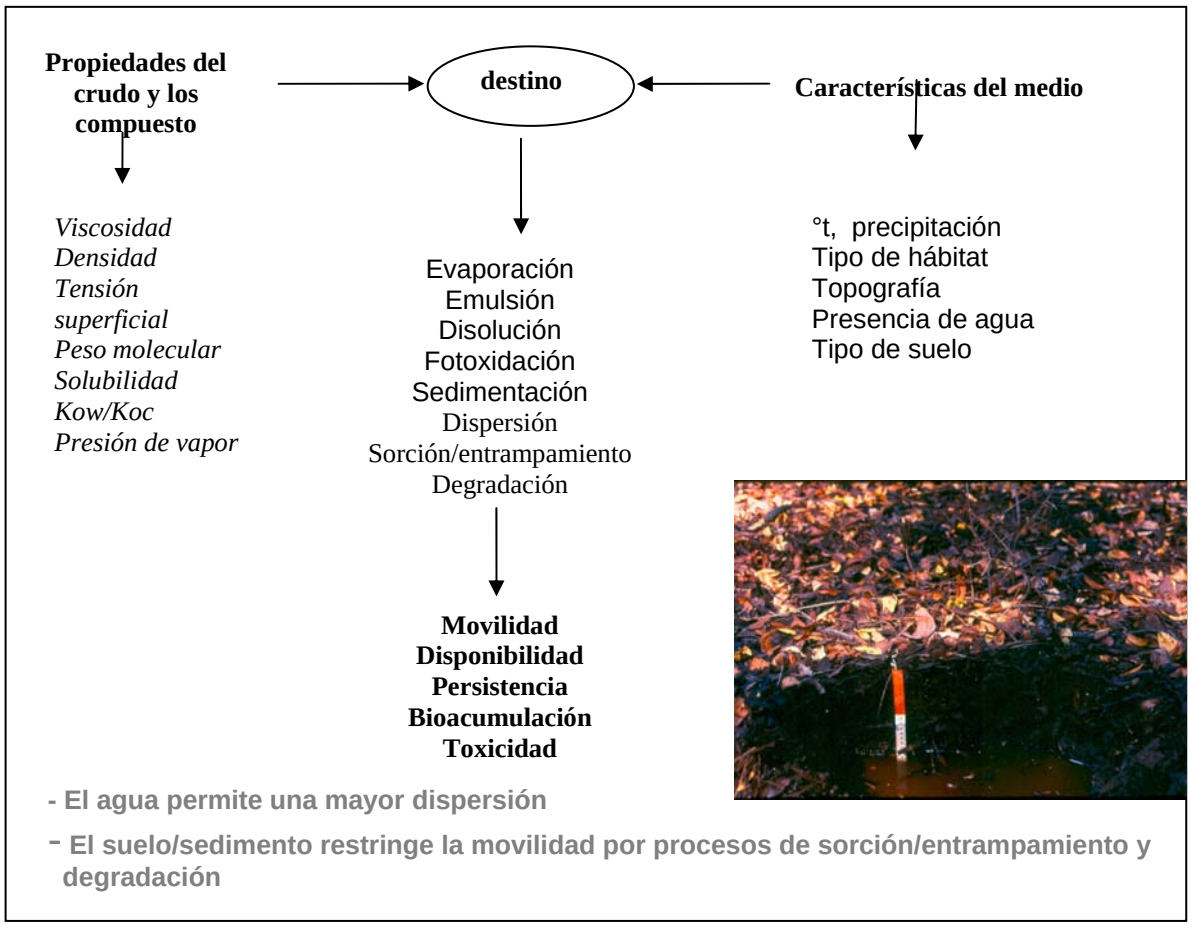

Figura 3. Factores que determinan el destino del petróleo crudo en el ambiente.

5.4. Especies afectadas por los derrames de petróleo crudo

En principio todos los animales y plantas pueden verse afectados por derrames de petróleo crudo que sucedan en el hábitat en donde se encuentran. El petróleo crudo puede afectar a los organismos por contacto directo (impregnación), por alteración de elementos esenciales de su hábitat o por efecto tóxico de sus componentes (figura 4). El impacto ambiental del petróleo derramado es siempre una mezcla compleja de estos efectos sobre todos los organismos del área afectada (EPA, 1999).

Algunos organismos especialmente susceptibles son:

- Organismos que se encuentran es estado de huevo, larva o juvenilPoblaciones con un número reducido de individuosPoblaciones restringidas a un área geográfica pequeñaEspecies amenazadasOrganismos que viven en el aguaOrganismos que buceanOrganismos que se alimentan en el agua
- Organismos que viven en la costaManglares

Los cuerpos de agua dulces son altamente sensibles a los derrames de petróleo crudo, ya que son importantes para la salud del ser humano y el ambiente y porque son áreas de anidamiento y representan fuentes de agua y alimento (EPA, 2007).

EFECTOS POR:

Contacto directo
- Afecta:
- Movimiento
- Termoregulación (hipotérmia)
- Respiración (sofocación)
- Fotosíntesis
- Reproducción (se cubren los huevos de crudo)

Alteración del hábitat
- Destrucción de fuentes de alimento y de agua limpia (deshidratación)
- Destrucción de hábitat

Efecto tóxico de los compuestos
- Inhalación
- Ingestión
- Contacto dérmico

(efectos crónicos a largo plazo)

- Desórdenes estomacales e intestinales por ingestión de crudo
- Neumonía por inhalación de vapores
- Irritación de piel y ojos por contacto directo

Figura 4. Efectos de los derrames de hidrocarburos sobre la biota.

5.5. Causas de ocurrencia de derrames

El transporte de petróleo crudo se realiza por diferentes medios; el más confiable y ampliamente usado es mediante ductos, que son tuberías de acero al carbón de grandes longitudes y de diversos diámetros, que pueden encontrarse enterradas o en la superficie del suelo o en cruces aéreos.

La bibliografía específica para tuberías de transporte de hidrocarburos identifica las siguientes causas que determinan accidentes en los ductos en todo el mundo (Olivera, 2006; Kumar Dey, 2002, NOM-SENER-2006): daños por terceras partes, corrosión, operaciones incorrectas y errores de diseño. Cada una de estas causas refleja varios elementos que se tienen que considerar para poder evaluar la posibilidad de ocurrencia de un derrame, como por ejemplo:

a) Para evaluar la afectación por terceras partes es necesario conocer:
   - la profundidad a la que el ducto está enterrado
   - el nivel de actividad en el área por donde corren los ductos
   - el estado de los derechos de vía (si está claramente marcado se reduce la posibilidad de daños por terceros)
   - el grado de vigilancia
b) Para evaluar la corrosión se necesita conocer:
   - el material del que está hecho el ducto y el diseño de la protección catódica
   - la antigüedad del ducto
   - el tipo de suelos, incluyendo información sobre el contenido de oxígeno y humedad
   - la capacidad de corrosión atmosférica
c) Para evaluar la posibilidad de que ocurra un derrame por operaciones incorrectas es necesario conocer aspectos del diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de los ductos

De acuerdo a la Agencia de Seguridad de Inglaterra (Olivera, 2006), los tipos de fallas más frecuentes a nivel mundial (Olivera, 2006) son: por error humano, sabotaje, actividades externas y fallas de equipo, que conjunto representan en19%, las ocasionadas por terceras partes constituyen 31% y los errores de operación y mantenimiento el 13%.

Según Olivera (2006), en el caso de PEMEX las causas que pueden originar fallas en el sistema de ductos son: la corrosión (51%), los golpes externos por maquinaria (25%), la fisura en la soldadura, la falla del material (10%) y las operaciones incorrectas (5%).

El proyecto de norma sobre administración de la integridad de ductos de recolección y transporte de hidrocarburos (NOM-SENER-2006) establece que para efecto de realizar la evaluación del riesgo y de la integridad de los ductos, así como tomar medidas de mitigación, los peligros potenciales deben agruparse de acuerdo a los factores de tiempo y modos de falla de la siguiente manera:

a) Dependientes del tiempo
    1. Corrosión externa
    2. Corrosión interna
    3. Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC)
b) Estables
    1. Defectos de fabricación
        i. Costura defectuosa
        ii. Metal base defectuoso
    2. Soldadura/fabricación
        i. Soldadura circunferencial o de fabricación defectuosa
        ii. Doblez por flexión o pandeo
        iii. Falla por alineamiento
    3. Del equipo
        i. Falla del empaque tipo O
        ii. Componente rayado o roto

iii. Mal funcionamiento del equipo de control o relevo
iv. Falla del sello/bomba

c) Independientes del tiempo
   1. Daños mecánicos o por terceros
      i. Daño ocasionado por terceros (falla instantánea/inmediata)
      ii. Tubería previamente dañada (modo de falla retardado)
      iii. Vandalismo
      iv. Impacto de objetos arrojados sobre el ducto
   2. Procedimientos de operación incorrectos
   3. Clima y fuerzas externas
      i. Tormentas eléctricas
      ii. Viento, tormentas o inundaciones
      iii. Sismos
      iv. Deslaves
      v. Huracanes
      vi. Erosión
      vii. Deslizamiento del lecho marino

Esta norma también describe la información que se requiere para realizar esta evaluación (tabla 1).

6. Área de estudio

6.1. Características del medio físico y biológico

El área de estudio se localiza al sureste del estado de Veracruz, comprende los Municipios de Coatzacoalcos, Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río, Ixhuatlán del Sureste, Agua Dulce, Cosoleacaque y la parte norte de los Municipios de Minatitlán y Moloacán; su superficie total es de 1775.90 km^2.

Desde el punto de vista fisiográfico corresponde a la provincia conocida como

Llanura Costera Veracruzana del Golfo Sur (INEGI, 1987; Hernández-Santana *et al.*, 2006). Respecto a su geomorfología, destacan por su extensión las planicies acumulativas fluvio-lacustres y palustres, de bajos inundados permanentemente, y costeras eólico-marinas (campos de dunas y cordones litorales). Estas últimas presentan llanuras onduladas y lomeríos suaves. Hacia el sureste, en los Municipios de Ixhuatlán y Moloacán, se localiza el relieve con mayor energía, conformado por laderas de más de 100 msnm.

La constitución geológica del área está representada principalmente por complejos carbonatados, terrígenos e intrusivos (domos salinos) de edad terciaria (Oligoceno) hasta el Reciente. La litología, en general, corresponde a lutitas, areniscas, margas, calizas y conglomerados para las rocas más antiguas, mientras que los depósitos recientes son de gravas, arenas, limos y arcillas que se encuentran fundamentalmente en las márgenes y lechos de ríos y arroyos, así como en la costa (Hernández-Santana *et al.*, 2006).

Tabla 1. Información requerida para evaluar riesgo de acuerdo a la NOM-SENER-2006.

TIPO	INFORMACIÓN
Diseño	Espesor de pared
	Diámetro
	Tipo de costura y factor de junta
	Fabricante
	Fecha de fabricación
	Propiedades del material
	Propiedades del equipo
Construcción	Año de instalación
	Método de doblado
	Método de unión o acoplamiento, resultados del proceso e inspección
	Profundidad de enterrado
	Cruces/encamisados

	Prueba hidrostática
	Método de recubrimiento de campo
	Tipo de suelo, relleno
	Reportes de inspección
	Protección catódica
	Tipo de recubrimiento
Operación	Servicio
	Volumen transportado
	Presiones de operación máxima y mínima normales
	Historial de fugas/fallas
	Condición del recubrimiento
	Funcionamiento de la protección catódica
	Temperatura del ducto
	Reportes de inspección
	Monitoreo de la corrosión externa e interna
	Fluctuaciones en la presión
	Funcionamiento del equipo
	Contacto con otros ductos
	Reparaciones
	Vandalismo
	Fuerzas externas
Inspección	Pruebas hidrostáticas
	Inspecciones internas
	Inspecciones con diablos geómetra
	Inspecciones puntuales
	Inspecciones de la protección catódica
	Inspecciones de la condición del recubrimiento
	Auditorias y revisiones

El patrón climático, definido de acuerdo a la región conocida como “Golfo de México”, está caracterizado por dos sistemas de vientos predominantes; en el verano y otoño los Alisios, las Ondas del este y los ciclones tropicales; en el invierno los Nortes (García *et al*., 1992). El clima es cálido-húmedo de los tipos Am(f) en prácticamente toda el área, salvo una pequeña porción situada al suroeste, que tiene clima Am (w) (García, 1992). La temperatura media anual es de 25 ºC; el mes más frío es enero, con 22 ºC, y el mes más caliente es mayo, con 27 ºC, por lo que el régimen térmico se considera tipo Ganges; es decir, la temperatura más alta se presenta antes del solsticio de verano. El total de precipitación anual está entre los 2300 y 2800 mm; el régimen pluvial es intermedio, toda vez que llueve todo el año, aunque las lluvias se concentran de junio a noviembre; el porcentaje de lluvia invernal es de 9 (García, 2004).

Hidrológicamente, la región pertenece a las cuencas bajas de los Ríos Coatzacoalcos y Tonalá. El Río Coatzacoalcos recibe, por su margen izquierda, al Río Calzadas y a los Esteros del Pantano, Huazuntlán y San Francisco y, por la derecha, a los Ríos Uxpanapa, Teapa, Arroyo Blanco, Coachapa y San Antonio. El Río Tonalá recibe, por su margen izquierda, a los Ríos Agua Dulce, Agua Dulcita, Tepexcuintle y El Arenal. Entre los aspectos más importantes de la dinámica fluvial cabe señalar la influencia de las inundaciones periódicas en las zonas de las planicies fluvio-lacustres y palustres; son comunes los procesos de flujo, reflujo y mezclas de agua, tanto de los ríos como en la marina, con cargas importantes de materia orgánica, sedimentos y contaminantes (Gobierno del Estado de Veracruz, 2002).

El conjunto de condiciones naturales que se presenta en la zona propicia el desarrollo de suelos que en general se consideran poco evolucionados. La mayoría derivan de los aportes de materiales no consolidados, cuyo origen básicamente es fluvial, coluvial, marino y eólico. En las planicies fluvio-lacustres y palustres son importantes los procesos de hidromorfismo y lixiviación de bases; los suelos son fácilmente inundables o permanecen inundados y muestran propiedades vérticas, dado el contenido elevado de arcillas. Estos suelos en seco se agrietan y endurecen y en húmedo aumentan su volumen; no obstante lo anterior, y puesto que se asocian con otros suelos, su textura es media. Los tipos de suelos más representativos son los Gleysoles mólicos, éutricos y vérticos, así como Vertisoles crómicos. Los suelos de las laderas y lomeríos también tienen propiedades vérticas, pertenecen a los tipos Cambisoles y Luvisoles, su textura también es media. En los campos de dunas y cordones litorales predominan los Regosoles éutricos de textura gruesa (arenosos) (SPP, 1984).

Las condiciones climáticas y geográficas que imperan en el sureste mexicano originan un hábitat propicio para el desarrollo de innumerables especies florísticas y faunísticas, dando como resultado una de las zonas más importantes en cuanto

a diversidad biológica y desarrollo de ecosistemas. La flora y fauna de la región neotropical del sur de Veracruz es altamente diversa en su biota y combina diferentes especies de origen neoárticó, así como endémicas. El área de estudio, que se encuentra en el sureste de este estado, es el hábitat de unos 50 géneros de plantas compuestas, de más de 30 géneros de aves y mamíferos, y más 20 géneros de anfibios y reptiles. Retomando el ejemplo de las aves, esta región de Veracruz es el paso de más de 100 especies migratorias que cubren dos importantes rutas: una sigue toda la costa del Golfo de México y otra que atraviesa el Golfo hacia el Caribe. De este total de especies de aves, un gran número es clasificado en alguna categoría de riesgo por la World Conservation Union (UICN) y la Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES).

La región de la cuenca baja del Río Coatzacoalcos, ha sido considerada como una de las zonas de mayor riqueza florística y faunística. Especialmente importantes son las selvas altas y medianas y los humedales que, junto con la vegetación riparia, integran un complejo mosaico de microhábitats.

No obstante la riqueza biológica reportada para la zona, en los últimos años su biota se ha visto amenazada e incluso, en situaciones más adversas, se ha originado la extinción de especies. La principal causa de esta problemática se origina por las actividades antropogénicas, sobre todo en el cambio de uso de suelo y el crecimiento urbano e industrial.

La cubierta vegetal de la cuenca baja del Río Coatzacoalcos y en particular de la Zona Conurbada de Coatzacoalcos-Nanchital-Ixhuatlán del Sureste ha sido afectada por el crecimiento urbano-industrial y la introducción de pastos para forraje de ganado bovino. De la misma forma, se han ampliado las superficies con fines industriales y habitacionales o para la construcción de carreteras, caminos, ductos y pozos de explotación petrolera. Para verificar esta situación, en este estudio se llevó a cabo una evaluación del cambio de uso de suelo por medio del

análisis de imágenes de satélite a diferentes periodos de tiempo, cuyos resultados se presentan en la sección pertinente.

6.2. Características del medio socioeconómico

La política de industrialización implantada en esta región en el periodo de auge petrolero, que otorgó prioridad al crecimiento industrial sobre el bienestar social, configuró zonas desiguales, agudas contradicciones sociales y concentró nuevas formas de pobreza y precariedad urbana. Se modificaron los patrones tradicionales de urbanización y el acelerado crecimiento demográfico rebasó los estrechos marcos de la planificación regional. De esta manera, el crecimiento anárquico e incontrolado de las ciudades y, principalmente, la ocupación de áreas inadecuadas para un desarrollo urbano óptimo y la falta de servicios públicos se convirtieron en la expresión más álgida del crecimiento económico (Legorreta, 1987).

En el caso de Coatzacoalcos, Minatitlán y Cosoleacaque, el mayor impacto demográfico se manifestó con la construcción del Complejo Pajaritos y la modernización del paso al sureste y del conjunto de muelles porteños durante los años de 1960 a 1970. En este periodo se presentaron tasas de crecimiento del orden de 7.2%, 6.8% y 6.7% (el promedio nacional fue de 3.4%). Este incremento generó un aumento de la extensión territorial urbana, principalmente en la cabecera municipal de Minatitlán y su conurbación con Cosoleacaque, a lo largo de la carretera estatal Acayucan-Villahermosa, debido a que al sur de esta vialidad se construyó el Complejo Petroquímico Cosoleacaque, el primer complejo de FERTIMEX e industrias como Celanese, Fenoquimia, Sales Nacionales y Tereftalatos Mexicanos. Con la construcción de estas instalaciones industriales, Cosoleacaque experimentó (entre 1970-1980) un incremento medio anual de 7.9% y consolidó su conurbación con Minatitlán.

A este proceso se sumó el Municipio de Ixhuatlán del Sureste con la participación de la localidad de Nanchital, que registró una tasa de crecimiento anual de 6.5%, como consecuencia de las migraciones motivadas por la construcción de los complejos de La Cangrejera y Morelos, y de industrias petroquímicas de la iniciativa privada que surgieron en torno a ellos. Agua Dulce, como localidad y municipio petrolero, sufrió (a partir de 1988) el advenimiento de migrantes, como consecuencia de la construcción de unidades habitacionales para los obreros que laboraban en los campos petroleros (Martínez, 2000).

En la evolución demográfica del sureste de Veracruz, durante el periodo 1970-2000, es evidente el vertiginoso crecimiento que experimentaron los Municipios de Coatzacoalcos, Minatitlán y Cosoleacaque, los cuales incrementaron su población en 113%, 107% y 128%, respectivamente.

La migración ha representado un componente importante en la dinámica demográfica de la región estudiada. Es necesario establecer una diferencia entre los desplazamientos dirigidos por PEMEX, para cuyo personal este fenómeno representa una posibilidad de promoción social y obtención de mejores salarios, con las migraciones rurales. PEMEX generó desplazamientos del Distrito Federal, Puebla, Monterrey y de antiguas zonas petroleras, caracterizados por la formación de mano de obra especializada que ocupó puestos directivos y administrativos en la paraestatal. Este personal contó además con facilidades para adquirir vivienda, automóviles y servicios.

El gran crecimiento diferencial del sector urbano de la población al interior de la región se correlaciona con la categoría migratoria de cada municipio. Los municipios de “atracción” (petroleros y agropecuarios) presentan una tasa de crecimiento urbano entre 3.1% y 4%, concentran el mayor porcentaje de población urbana desde 1970 y, por consiguiente, sus espacios rurales se han visto disminuidos. Los municipios considerados como de “equilibrio”, con tasas de

crecimiento que oscilan entre 2.1% a 3%, han evolucionado de acuerdo a su situación local, en ausencia de fuerzas externas que aceleren su crecimiento (INEGI, 1970,1990).

Las migraciones rurales a las áreas urbanas y los incrementos registrados por el crecimiento natural de la población, ha dificultado aún más la satisfacción de las necesidades sociales mínimas. Entre los impactos más relevantes de este fenómeno destaca la fuerte demanda de suelo para edificar viviendas, lo cual tuvo como resultado el surgimiento de asentamientos en áreas poco aptas para tal fin, el crecimiento de los índices de hacinamiento, la especulación con la tierra y, particularmente, el crecimiento acelerado de las zonas urbanas periféricas. De este modo, creció la industria de la construcción y se amplió del sector terciario.

En contraste, las actividades primarias tendieron a perder importancia en la economía regional, ganando terreno la ganadería y las actividades urbanas (Legorreta, 1987). Esto fue el indicador fundamental de un proceso de descampesinización que "*… no siempre determina un desplazamiento físico o expulsión migratoria de grupos campesinos, mas bien se trató de una expulsión económica*" (Tudela, 1992), es decir, existió una desvinculación del ámbito agropecuario sin abandonar físicamente el medio rural.

En el decenio de los años 70, la población económicamente activa (PEA) regional representó el 24.8% de la población total, de la cual el 61% se dedicaba a las actividades agropecuarias, 16.4% al sector industrial y 16.5% se concentraba en las actividades terciarias. Veinte años después, se dio una distribución menos discrepante entre los tres sectores: el primario con 40.4%, el secundario con 25.2% y terciario con 27.2% (INEGI, 1970,1990).

Sin duda, la acelerada expansión petrolera fue el principal motor de los cambios

que experimentó la economía regional, aún cuando su influencia haya sido indirecta.

7. Alcances

Para el desarrollo del presente trabajo se llevaron a cabo varias reuniones tanto de información como de discusión con el fin de aclarar lo más posible el enfoque al que se debía orientar, en función de la utilidad potencial para sus usuarios. Esto responde a las necesidades o lineamientos específicos del Instituto Nacional de Ecología que intenta hacer el producto lo más versátil y útil posible, en este caso considerando las sugerencias de diferentes instituciones y entidades que se ven involucradas al atender este tipo de eventos.

En este sentido se dio prioridad a:

- Preservación de los recursos naturales (condición actual de los ecosistemas encontrados)
- Dispersión del petróleo crudo
  - Velocidad (pendiente-relieve)
  - Extensión afectada (considerando al agua como vehículo principal de dispersión)
- Persistencia del petróleo crudo en el sitio
- Entrampamiento (permeabilidad del terreno y accesibilidad para su limpieza)
- Tipo de atención
  - Inmediata en el caso de alta velocidad y amplia extensión afectada
  - Efectos a largo plazo o persistentes en caso de mucha permeabilidad o poca accesibilidad

Este trabajo forma parte de un proyecto general más ambicioso con el que se pretende escalar la metodología que aquí se genere a otras regiones, y con ello generar herramientas de utilidad a nivel nacional con el fin de optimizar la previsión y atención de este tipo de eventos. Antes de extender la aplicación de

esta metodología a otras regiones de México, es necesario afinarla mediante estudios locales que con la ayuda de modelos que puedan evaluar su capacidad predictiva.

8. Metodología

8.1. Validación de información

Se realizó una revisión, selección, depuración y validación de la información cartográfica existente del área de estudio, a escala 1:50,000 y en formato digital (raster y vector). Esto implicó la limpieza topológica de cada una de las capas de información (punto, línea, polígono y “grid”), así como la unión del mosaico que resulta de las cartas a utilizar que cubren el área de estudio (seis cartas topográficas localizadas en el Istmo de Tehuantepec: E15a84, E15a85, E15a86, E15c84, E15c85, E15c86). La cobertura limpia y sin costuras permitió establecer los parámetros de referencia espacial como son la zona UTM y el Datum, garantizando una sobreposición de capas para el análisis espacial del área de interés.

Asimismo, se llevó a cabo la edición y topología de 79 *shapes,* utilizando el programa ArcMap 9.0. Estas tareas consistieron en: limpiar y organizar los archivos vectoriales por tipo, dejándolos sin nodos sueltos; verificar que contuvieran una descripción en su respectiva base de datos; que fueran continuos en el “espacio” (sin faltantes en las secuencias); que fueran etiquetados con un identificador único y que representaran una geometría única de acuerdo a su tipo y representación espacial, evitando errores de sobreposición no deseados o espacios vacíos entre vectores. Los archivos trabajados abarcan los temas de medio urbano, medio físico e infraestructura de PEMEX.

Posteriormente, se realizó la definición y reproyección de los 79 *shapes* a UTM WGS84 Zona 15 Norte. Estas tareas consistieron en dar de alta los parámetros de

ubicación en el plano terrestre, lo cual permitió que todas las capas de información, tanto vectoriales o raster, coincidieran en el espacio y que se pudiera utilizar un sistema cuantificable los más real posible, de acuerdo a la escala de trabajo. Con ello, se creó un modelo digital de terreno (MDT) y una *Triangular Irregular Network* (TIN) con base en curvas de nivel cada 20 metros, a escala 1:50,000.

Por otra parte, se llevó a cabo la georeferenciación de dos imágenes SPOT, mediante el programa ENVI 4 (Spot Pancromática con resolución espacial de 10 metros y Spot Multiespectral con resolución espacial de 30 metros).

La incorporación del enfoque sistémico (Teoría de Sistemas) aportó un esquema de análisis que sirvió como punto de partida para el estudio de la infraestructura industrial y del territorio donde se inserta.

A partir del conocimiento de las estructuras industriales, se explican los impactos que genera esta actividad sobre los restantes componentes del sistema territorial (población, características socioeconómicas y organización espacial), para examinar y valorar las manifestaciones negativas, aspecto que vincula los estudios geoindustriales a los de otras áreas de la investigación geográfica (Méndez y Caravaca, 1996).

Para alcanzar esta meta se realizó una revisión y selección de información bibliográfica, hemerográfica y estadística. Para esta última se empleó la información que el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) publica en los Censos de Población y Vivienda (2000) y en el Conteo de Población (2005).

Por lo que respecta a los datos correspondientes a la infraestructura petrolera existente en el área de estudio, se obtuvo su localización, capacidad instalada y producción en los Anuarios Estadísticos y Memorias de Labores de 2006

publicados por PEMEX. Para el trazado de los derechos de vía del sistema de ductos que conecta la refinería de Minatitlán con los Complejos Petroquímicos de Cosoleacaque, Pajaritos, La Cangrejera y Morelos se utilizaron las cartas de INEGI escala 1:250,000 y se complementó con la información que proporciona PEMEX en la publicación anual “Memoria de Labores”. Cabe destacar que estas fueron las únicas fuentes a las que se tuvo acceso.

8.2. Elaboración del mapa de geosistemas

A partir de la Conferencia de Estocolmo, en 1972, se da inicio a las investigaciones sobre la problemática ambiental en México, en el marco de los planes y programas de desarrollo. Desde entonces han prevalecido dos enfoques en la manera de analizar al ambiente. El primero, consiste en una visión tradicional, netamente reduccionista, que se concreta a la simple observación y a la descripción particularizada de los fenómenos. Las investigaciones al respecto se caracterizan por ser monográficas; por no integrar al conjunto de elementos o componentes, pues sólo tratan uno a la vez y por no tomar en cuenta las interacciones. Es decir son inventarios estáticos.

El segundo enfoque corresponde a la visión integral (global y sintética), la cual se basa en regionalizaciones jerárquicas que consideran aspectos naturales y socioeconómicos y que incluye también criterios relativos al patrimonio natural y cultural. Como ejemplo de estas regionalizaciones se pueden citar aquellas desarrolladas por Ortiz-Solorio y Cuanalo, 1978; Cuanalo *et al*., 1980; Quiñones, 1980; SAHOP, 1981 y SEDUE, 1986. Asimismo, existen otras regionalizaciones integrales con inclinación económica como la de Bataillon, 1969 y Bassols, 1982.

Las regionalizaciones anteriores buscan un enfoque sistémico, es decir: transdisciplinario, integral y sintético. Se basan en la Teoría General de Sistemas, particularmente en los modelos explicativos de la física. Esta teoría define al sistema (Carnot, 1824 en Tricart, 1978) como un conjunto de fenómenos

interdependientes que se caracteriza por una dinámica y, por tanto, debe estar alimentado de energía. Los flujos de energía y las transformaciones de ésta definen su estructura. En principio adimensionales, los sistemas encajan unos en otros. A cierto nivel de estudio, un sistema se define a partir de las interacciones entre sus componentes que pueden, ellos también, ser estudiados en tanto que también son sistemas. Desde este punto de vista, son considerados subsistemas del sistema precedente y así sucesivamente.

El método de estudio de sistemas tiene un enfoque estructural (integral y funcional). Éste constituye un instrumento lógico y puede aplicarse a numerosas disciplinas, entre ellas la ecología y la geografía. Este método les es particularmente adecuado a estas disciplinas, pues tiene sus fundamentos en una dialéctica permanente entre los componentes físicos, biológicos y humanos.

En ecología se desarrolló el concepto de ecosistema y en la geografía el de geosistema. En los estudios ecogeográficos de Tricart y Killian (1979), ambos términos se integran en geoecosistemas y posteriormente derivaron otra vez en geosistemas. Fue Sochava (1963, citado en González, 1994) quien lo define como un “sistema de relaciones geográficas”, constituido por un conjunto de elementos y componentes que son interdependientes y se caracterizan por tener una estructura y dinámica particular. Un geosistema es el resultado, en un marco espacio-temporal dado, de la interrelación naturaleza-sociedad-economía. Su significado es similar al de unidad espacial, unidad ambiental, unidad homogénea, paisaje, complejo territorial, entre otros.

Entre los procesos globales que caracterizan al geosistema se encuentran:

- Transferencia de materia
- Transferencia energía
- Evolución del sistema en el tiempo
- Evolución del sistema en el espacio

En México, este enfoque se ha venido utilizando desde 1992. El principal antecedente cartográfico aplicado al estudio del medio ambiente se encuentra en el Atlas Nacional de México (Oropeza *et al.*, 1992), específicamente en la carta denominada Síntesis del Medio Ambiente (escala 1:4,000,000), la cual se basó en los trabajos del Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1989). Otros ejemplos se encuentran en el Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán (Oropeza *et al*., 1999), en su carta de los Principales Geosistemas de la Península de Yucatán a escala 1:1,200,000, y en el Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec (Sánchez y Oropeza, 2003), con su mapa de Geosistemas, a escala 1:1,000,000. La información de este último mapa permitió realizar, a escala regional, una evaluación de la problemática ambiental de la zona de Coatzacoalcos, donde se destacan los principales impactos de origen natural y antropogénicos.

La diferenciación y delimitación de los geosistemas se lleva a cabo tipológicamente, es decir, se conforman unidades homogéneas y a la vez repetitivas, mismas que siguen un orden jerárquico y, dependiendo de la escala, se constituyen como unidades areales, puntuales o lineales.

Para diferenciar espacialmente a los geosistemas son necesarias las imágenes de satélite, las fotografías aéreas y la cartografía básica impresa o digital (cartas topográficas, geológicas, geomorfológicas, de vegetación y uso del suelo), además del apoyo de documentos bibliográficos, hemerográficos y trabajo de campo. Todo lo anterior integrado en un sistema de información geográfica.

De acuerdo a los conceptos antes descritos, en el presente estudio los geosistemas se clasificaron de la siguiente manera:

- Primer orden: grado de modificación en la fisonomía (antropogénicos, naturales y semitransformados).
- Segundo orden: influencia más importante según los procesos productivos y de funcionamiento (tecnógenos y agrarios), y por su ubicación, estructura y funcionamiento (terrestres, transicionales y marinos).

- Tercer orden: se distinguen por la modalidad que precisa la influencia principal (tecnógenos-industriales, agrarios-cultivos de riego y de temporal; terrestres-bioclimáticos-hidrodinámicos; transicionales-planicies costeras).
- Cuarto orden: subtipos de la influencia principal (deriva del tercer orden). (petroleros, mineros, selvas altas y medianas, etc.).

La utilización del enfoque geosistémico se eligió para definir las unidades ambientales homogéneas porque facilita su manejo, toda vez que se adapta a las diversas escalas espaciales que requiera el análisis, y porque no multiplican las capas temáticas creando numerosas unidades, sino que sintetiza territorialmente los diferentes componentes de los sistemas naturales, sociales y económicos.

8.3. Trabajo de campo

Para verificar la información plasmada en los mapas de geosistemas y de uso del suelo se realizó una salida a campo del 2 al 7 de septiembre de 2007, la cual consistió en hacer un recorrido por toda el área de estudio para llevar a cabo observaciones específicas. El itinerario del recorrido fue el siguiente:

- 3 de septiembre: Agua Dulce-Tonalá-Coatzacoalcos
- 4 de septiembre: Laguna de Ostión-Cosoleacaque
- 5 de septiembre: Nanchital-Las Choapas-Moloacán. Este mismo día se celebró una entrevista con el Presidente Municipal de Nanchital, Dr. Francisco León Ocejo, y se obtuvo el apoyo del Ing. Manuel López, del área de protección civil del Municipio de Nanchital, para hacer un recorrido por la demarcación y visitar sitios afectados por derrames en los últimos años.
- 6 de septiembre: Río Coatzacoalcos. Este recorrido se realizó desde Nanchital hasta el puente Coatzacoalcos I, en una lancha proporcionada por el Municipio de Nanchital y con la asistencia del Lic. Fabián García.

En el anexo 4 se incluye el mapa y una tabla descriptiva (esta última sólo en la versión digital de este informe) del recorrido de campo y la ubicación de sitios de

verificación, con las fotografías tomadas durante el recorrido.

Las observaciones realizadas en el campo incluyeron los siguientes aspectos:

- Se verificó el tipo de vegetación/uso de suelo más importante en cada geosistema. Esto se llevó a cabo de forma visual tratando de abarcar toda la zona de estudio. El recorrido se realizó en vehículo por lo que no se pudo tener acceso a ciertas zonas que se encontraban inundadas (humedales) o donde no hay caminos. No obstante, se considera que se lograron verificar todos los sitios en los cuáles se tenían duda del tipo de vegetación o uso de suelo que prevalecía. Un punto importante obtenido de la verificación de campo es que se detectaron plantaciones importantes de eucalipto, palma de aceite africana y árbol de hule, que no habían sido previamente identificadas en el mapa.
- En cortes de carretera se hicieron observaciones en relación a los suelos y su permeabilidad. Esto se llevo a cabo a través de evidencias como encharcamientos en la superficie del terreno y la presencia de manchas y motas en la cara del suelo expuesto. Estas evidencias indican que en esos suelos existen condiciones reductoras durante un determinado tiempo, lo que permite inferir que el agua de lluvia tarda en filtrarse a través de esos suelos (figura 5).

Con la información obtenida en campo se realizaron correcciones y adecuaciones al mapa de geosistemas y sirvió además para confirmar las clases de uso de suelo utilizadas en el análisis de imágenes satelitales para establecer cambios de uso de suelo.

8.4. Procedimiento de análisis jerárquico

El problema de establecer sensibilidad ambiental ante derrames de petróleo crudo es bastante complejo, dado que no es una característica que se puede medir en sí misma. Además, concurren muchas variables y situaciones específicas, como por ejemplo el enfoque del problema dado por la visión del personal involucrado (diversidad de criterios u opiniones) y su grado de participación-responsabilidad en

las acciones a tomar. Otras consideraciones a observar son las limitantes impuestas por la calidad-cantidad de información adecuada y disponible, la limitante del tipo de escala de medición en la que se reporta la información de base (cualitativa o cuantitativa) y la de la escala geográfica seleccionada.

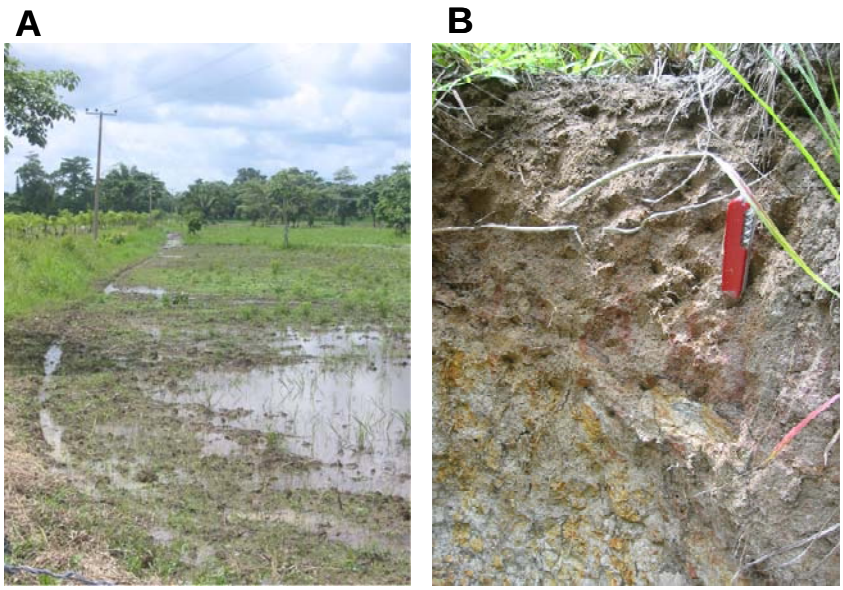

Figura 5. Observaciones de campo para evaluar la permeabilidad en suelos del área de estudio. A) evidencias de encharcamiento y B) manchas y motas en un perfil de suelo.

Para abordar este tipo de problemas complejos, se han propuesto diferentes esquemas conceptuales conocidos genéricamente como técnicas multicriterios. Estas técnicas se aplicaron inicialmente para establecer la aptitud de tierras ante diferentes usos propuestos y, dada su demanda, tuvieron una rápida evolución durante el siglo XX, conjuntamente con sus versiones computacionales. Collins y colaboradores (2001) identifican dos tendencias en esta línea de investigación a lo largo de la década de los noventa. Una de ellas fue enfocada a los análisis por medio de sistemas de información geográfica para establecer límites espaciales mediante el empleo de lógica booleana, combinada con la teoría de conjuntos difusos, para establecer los niveles de pertenencia. Estos estudios fueron enfocados a flexibilizar la asignación de una unidad de terreno a una de varias posibles categorías.

La otra tendencia trata el problema de la incorporación de las preferencias de los actores en los problemas de evaluación de sitios. Esta segunda tendencia es la que dio origen a las evaluaciones multicriterio que sirven de apoyo en la toma de decisiones cuando se tienen varias o muchas opciones y opiniones. La propuesta de un método concreto en este sentido le corresponde a Banai-Kashani (citado en Collins *et al*., 2001). Esta propuesta, conocida como procedimiento de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), consiste en un método matemático para estimar el valor de una función basándose en una serie de comparaciones por pares y utilizando dicha función para ordenar las alternativas u opciones en un esquema jerárquico.

El hacer comparaciones es muy recurrido en el ámbito científico, pero normalmente se requiere un estándar o patrón. Para el caso de áreas o terrenos impactados es muy difícil (si no imposible) encontrar ejemplares inalterados, por lo que Saaty (1987) sugiere el uso de la dependencia estructural, esto es, un método de evaluación relativa o interna, comparando los elementos que conforman el conjunto bajo estudio. Bajo este esquema se calculan pesos (o importancia) relativos de sitios alternativos por medio de comparaciones simples entre pares de ellos.

Este procedimiento está basado en un esquema lógico y jerárquico en el que se definen los niveles de análisis con información del mismo nivel de generalización, evitando mezclas o confusión en el manejo de información equivalente. En la figura 6 se presenta el esquema AHP diseñado para el presente estudio.

El procedimiento de análisis jerárquico tiene otras ventajas agregadas, se adapta fácilmente a condiciones en las que sólo se cuenta con datos limitados, permite la incorporación o mezcla de información tanto cuantitativa como cualitativa y toma en consideración las relaciones entre las variables involucradas. Otra característica que lo hace muy versátil es que posee un método asociado para calcular el nivel de inconsistencia, el cual resulta al calificar todos los pares de

opciones, ya que en muchas ocasiones son tantos pares que necesariamente hay equívocos en las apreciaciones.

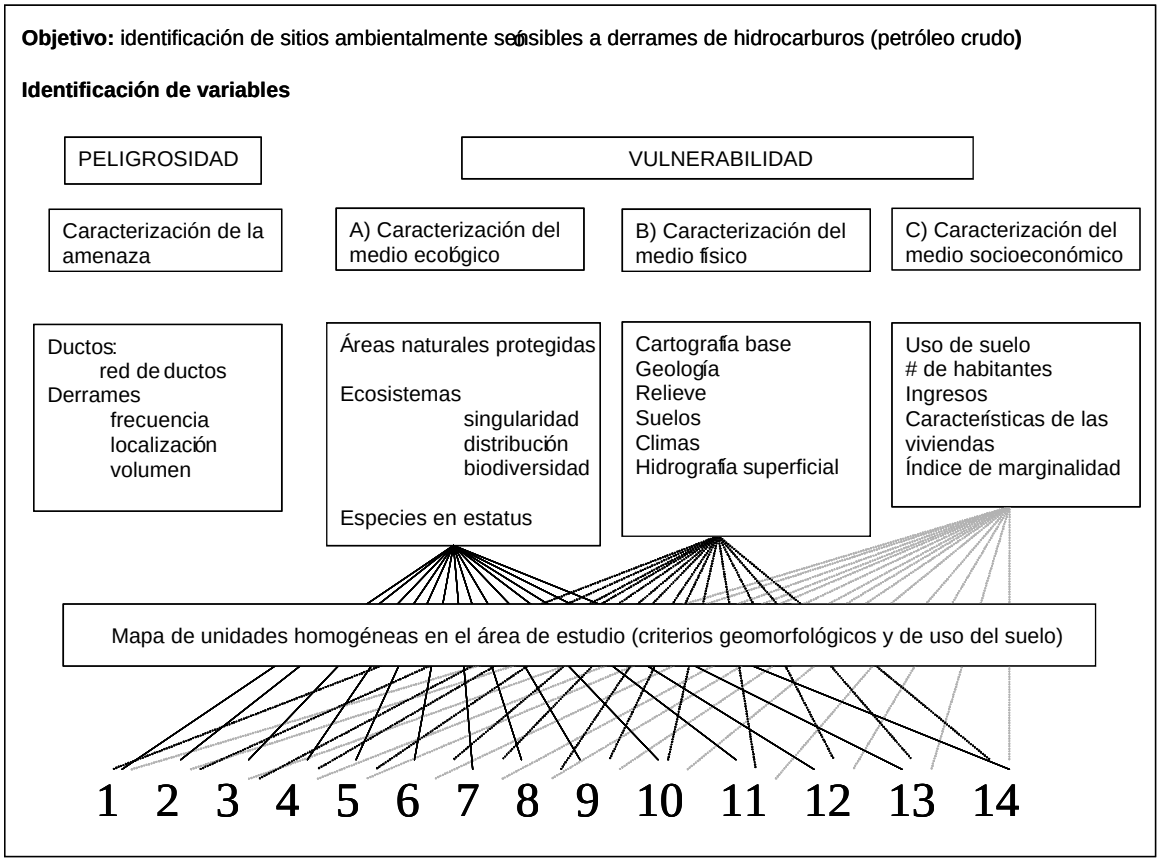

Figura 6. Esquema del procedimiento de análisis jerárquico (AHP) diseñado para el presente estudio.

Dada su sencillez y aplicabilidad a diversos campos, este método (sólo o acompañado de otras técnicas) ha sido adoptado por multitud de usuarios y ha sido probado para la resolución de problemas de muy diferentes ámbitos y temáticas, de los cuales se citan algunos ejemplos a continuación:

- Aptitud de tierras para diferentes propósitos (Aras *et al.* 2004; Basnet *et al.*, 2001; Hokey, 1994; Siddiqui *et al*., 1996; Tseng *et al.*, 2001)
- Manejo de recursos ambientales (Gamini, 2004; Lahdelma *et al.* 2000; Mardle *et al.*, 2004; Mendoza and Prabhu, 2000; Pavlikakis and Tsihrintzis, 2003; Zhu and Dale, 2000)
- Evaluaciones ecológicas (Anselin y Meire, 1989; Bojórquez-Tapia *et al.*, 2002; Purnendu and Ritwik, 2003; Tran *et al.* 2002)

- Evaluación de diferentes productos o procesos industriales en función de su aceptación o por sus impactos ambientales potenciales (Chien-Chung and Hwong-Wen, 2004; Dey, 2002; Kazakidis *et al.,* 2004; Li and Hui, 2001; Pineda-Henson *et al.*, 2002; Sadiq *et al.,* 2003; Sólones, 2003; Yedla and Shertha, 2003)
- Evaluación del grado de compromiso de la sociedad en cuestiones ambientales (Duke and Aull-Hyde, 2002; Kovacs, *et al.,* 2004; Malczewsky and Moreno-Sánchez, 1997; Smith-Korfmacher, 2001)
- Transparencia en las decisiones (Spires, 1991)

En México este método también se ha empleado con frecuencia (Bojórquez-Tapia *et al.,* 2001, 2003, y 2004; Cram *et al.,* 2006; Malczewski *et al.,* 1997).

8.4.1. Categorías de vulnerabilidad

Para este trabajo, se acordó considerar cinco categorías de vulnerabilidad, las cuales son las siguientes:

- Vulnerabilidad muy alta (nivel I)
- Vulnerabilidad alta (nivel II)
- Vulnerabilidad media (nivel III
- Vulnerabilidad baja (nivel IV)
- Vulnerabilidad muy baja (nivel V)

Considerando la extensión del área de estudio se optó por una escala regional (1:50,000), que es la que más se adapta tanto al tamaño, como a la información existente.

El esquema jerárquico de aproximación metodológica diseñado para este estudio (figura 6) consta de tres niveles, el primero y más general considera tres ámbitos a caracterizar y que se denominaron respectivamente medio físico, medio biológico y medio socioeconómico.

Un primer paso fue una reducción del área de estudio, descartando aquellas áreas que por sus características especiales ya han sido juzgadas como áreas extremadamente vulnerables . Estas partes fueron las siguientes:

- Las ciudades con más de 15,000 habitantes, incluyendo Coatzacoalcos, Allende, Minatitlán, Nanchital, Cosoleacaque, Agua Dulce, las cuales cubren una superficie de 92.7 km^2, que equivalen al 5.22% del total del área de estudio. Tal como lo juzga CENAPRED
- Las áreas bajo un esquema oficial de protección ya sea federal o local, tal como lo juzga INE-SEMARNAT: La Alameda, Ostión-Duport y Jaguarundi. No se cuenta con información del área ocupada por estos últimos dos.

Estas áreas, por su condición de vulnerabilidad extrema, ya no se consideraron en las siguientes etapas de la evaluación y fueron directamente catalogadas dentro de el nivel I de vulnerabilidad.

A partir de los resultados de la revisión y compilación de información, se detectó una serie de variables, que aunque se reportan relacionadas con la vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos y se dispone de la información, resultó que sus valores o clase son compartidas por toda el área de estudio y, por lo tanto, sólo nos permitieron establecer una caracterización general de la misma. Dichas variables fueron las siguientes:

- Clima: es del tipo cálido-húmedo de los tipos Am(f) en prácticamente toda el área de estudio y permitió establecer el nivel de sensibilidad como base de referencia.
- Susceptibilidad general a desastres: la zona es considerada de alta sensibilidad tanto a desastres naturales (Nortes, huracanes, subsidencia, inundaciones), como a desastres de naturaleza antropogénica (degradación de tierras).
- Tipos de costas: en el área dominan las costas de tipo arenosas. Las costas fueron consideradas como un geosistema más a evaluar por medio del procedimiento AHP.
-

Al analizar el resto de la información compilada, se vio la necesidad de ajustar la

metodología, ya que las variables seleccionadas para caracterizar el medio terrestre no podían aplicarse a las aguas continentales, mismas que, además de ser muy abundantes en el área de estudio, son el principal vehículo de dispersión de hidrocarburos en casos de derrame. Por este motivo se adaptó una metodología combinada que incluyó dos fases.

Primera fase, determinación de niveles de vulnerabilidad I y II

Estos niveles de vulnerabilidad se establecieron considerando la dispersión que pueden sufrir los hidrocarburos derramados en los eventos de inundación del curso bajo del Río Coatzacoalcos.

El análisis sistemático de la morfología del lecho fluvial a lo largo del curso bajo permite conocer la susceptibilidad al peligro de las inundaciones en los terrenos adyacentes, ya que esta morfología es el reflejo de las condiciones del escurrimiento, considerando que las variaciones del gasto y la velocidad de la corriente, así como los diferentes niveles de la superficie del agua determinan en gran medida la forma del cauce.

Con base en estos conceptos se pudieron distinguir tres fases en el comportamiento del lecho fluvial, que pudieron ser reconocidas por medio del modelado geomorfológico y la clasificación propuesta por Trestman (1964) y Tricart (1960) (en Mayerink, 1970), modificada para su aplicación al Río Coatzacoalcos. Estas fases son las siguientes:

- Fase de niveles bajos y medios, que es en la que las corrientes coinciden o se aproximan al valor del escurrimiento medio anual. Por ser sólo un valor numérico del caudal, al ponderar tanto los valores altos y bajos del gasto no se puede esperar una clara indicación en las características del canal; sin embargo, se ha observado que en la mayoría de los casos, los caudales medios cubren un tercio del lecho ordinario (Leopold, 1964, referido en Mayerink, 1970). Esta fase obviamente corresponde a la de estabilidad del cauce.

- Fase de niveles altos, correspondiente a las crecidas ordinarias, en donde se reconocen dos modalidades: a los escurrimientos con flujos a pleno bordo o muy cerca del nivel de contención del lecho ordinario y los de desborde, que sobrepasan las riberas del lecho ordinario e inundan periódicamente o estacionalmente (cada año o una o más veces cada dos años).
- Fase de desbordes extraordinarios, en la que la avenida de agua rebasa el nivel de las riberas altas, inundando esporádicamente el lecho mayor excepcional o la llanura alta de inundación.

La fase de niveles altos ordinarios se presenta en los periodos de retorno estacional muy corto y de frecuencia mayor, y se asocia en el caso que nos atañe con las de zonas de vulnerabilidad nivel I (vulnerabilidad muy alta).

La fase de niveles de desbordes extraordinarios se refiere a eventos menos frecuentes en periodos de retorno comprendidas entre 2 y 10 años, y se asocian en este caso a las zonas de vulnerabilidad nivel II (vulnerabilidad alta).

En el área de estudio la margen izquierda del Río Coatzacoalcos es la más susceptible, ya que a partir de ella se extienden la mayoría de los humedales de las tierras bajas. Por el contrario, pocas zonas inundables se despliegan desde la margen derecha, pues la topografía de lomeríos impide una mayor extensión.

Segunda fase, determinación de niveles de vulnerabilidad III, IV Y V

Las tres categorías de vulnerabilidad restantes (niveles III, IV y V) se determinaron mediante la aplicación del AHP. Durante esta fase se trabajó en la construcción del mapa de los geosistemas más representativos de la zona de estudio y en la sistematización (digitalización y alimentación de SIG) de la información de las variables a considerar.

Las variables seleccionadas, que exhiben cambios al interior de la zona de

estudio, fueron las siguientes:

Medio físico

Pendiente-Relieve

El criterio propuesto en las ISA (NOAA, 2002) para esta variable es el siguiente:

- Terreno con pendiente escarpada: >30º de inclinación
- Terreno con pendiente moderada: entre 30 y 5º de inclinación
- Terreno con pendiente ligera: <5º de inclinación
- Terreno plano: sin inclinación

La pendiente por sí sola no resultó una variable aplicable a la zona de estudio, dado que predominan las pendientes planas y ligeras, además de que gran parte de la superficie es una planicie acumulativa; el resto es una serie de lomeríos suaves y laderas con relieve muy cambiante. Por este motivo, se decidió combinar la pendiente con el relieve. Su evaluación fue cualitativa, deduciendo sus efectos sobre la dispersión y dificultad de limpieza de un derrame, a partir del modelo digital del terreno (MDT).

De acuerdo a lo anterior el criterio empleado fue: a mayor pendiente mayor dispersión, a terreno más accidentado mayor dificultad de acceso y mayor dispersión del hidrocarburo, por tanto el geosistema evaluado tendrá mayor vulnerabilidad.

Permeabilidad

La permeabilidad se consideró por su influencia sobre la persistencia de los efectos de los hidrocarburos derramados; además de que los sitios más permeables implican atención inmediata. La información que se empleó para su evaluación cualitativa se muestra en el mapa de suelos e incluye criterios

geomorfológicos y de uso del suelo, considerados en la elaboración del mapa de geosistemas.

Para esta variable el criterio empleado fue: a mayor permeabilidad mayor infiltración, el hidrocarburo será más difícil de limpiar y sus efectos perdurarán por más tiempo, por lo tanto, el geosistema se considerará más vulnerable.

Medio biológico

Riqueza

La riqueza se refiere al número total de especies diferentes que alberga cada uno de los geosistemas. La intención que se persigue con esta variable es la protección de recursos naturales de la zona. Su evaluación se llevó a cabo de manera cualitativa, considerando las secuencias de riqueza propuestas por varios autores (Rzedowsky, 1978). La información utilizada para su evaluación se muestra en el mapa de geosistemas.

En este caso el criterio empleado fue: a mayor número de especies mayor vulnerabilidad, dado el mayor valor del recurso natural dominante en cada geosistema.

Singularidad

Para la singularidad se consideró que entre más raro es un recurso, en términos de superficie ocupada a nivel local, nacional o mundial y del número de especies endémicas o en estatus que contenga, habrá que hacer mayores esfuerzos para su conservación. La evaluación de esta variable entre los geosistemas implicados se llevó a cabo tomando en cuenta la información proporcionada por la CONABIO. En este caso sólo se pudo llevar a cabo una comparación cualitativa.

Para la singularidad el criterio empleado fue: entre más raro es el geosistema a nivel regional, nacional o mundial y entre más especies raras o en estatus contiene, más vulnerable se considera, en función de la protección de recursos naturales.

Fragmentación

Un ecosistema es más resistente a perturbaciones entre menos perturbaciones previas haya recibido, por lo que se hace necesario preservar esta condición. Esta variable pudo evaluarse para cada geosistema con base en las imágenes que se compilaron para el área de estudio. En ellas se evaluó la integridad-continuidad de los ecosistemas propios de la zona por su grado de fragmentación o distribución en mosaicos o parches. Este criterio resultó un poco menos cualitativo que los dos anteriores. Se evaluó a través de la fragmentación que muestran los polígonos de los diferentes geosistemas. Paralelamente y dentro del propio grupo de trabajo, se llevó a cabo una evaluación para estimar la tasa y los alcances de los cambios del uso del suelo en el área de estudio, la cual se utilizó para tener una idea de la velocidad de cambio de uso de suelo en general para la zona.

En el caso de la fragmentación el criterio empleado fue: a mayor integridad-continuidad de un tipo de vegetación natural, más sensible será el geosistema que lo contiene. Esto con miras a la protección de los recursos bióticos mejor conservados.

Medio socio-económico

Índice ponderado de marginación por geosistema

Previa recopilación de datos estadísticos, se localizaron en el mapa de geosistemas los Índices de Marginación que publica la CONAPO por municipio y localidad. Las localidades con índices altos y muy altos de marginación se

ponderaron en función la población total y la densidad de población (hab/km^2) presentes en cada geosistema.

Se construyeron los intervalos de valores correspondientes y se obtuvo una variable numérica que permitió establecer las diferencias entre pares de geosistemas de manera cuantitativa.

El criterio empleado para este índice fue: a mayor índice de marginación mayor es la vulnerabilidad de la población que habita en ese geosistema, referida esta vulnerabilidad a la susceptibilidad de sufrir daños físicos directos.

Índice ponderado de actividades productivas

Previa recopilación de datos estadísticos relativos a la PEA ocupada por sector económico (primario, secundario y terciario), los cuales publica el INEGI, se localizaron en el mapa de geosistemas los diferentes municipios y localidades del área de estudio.

Los valores de los sectores con mayor número de PEA ocupada, es decir el primario y secundario, se sumaron por considerarse los más vulnerables, ya que en casos de siniestro sufren más pérdidas económicas o de bienes estos sectores que los del sector terciario. Los valores totales obtenidos de esta forma se ponderaron en función de la proporción que ocupa la PEA total por geosistema y su densidad con respecto al área total. Con esto, se obtuvo una variable numérica que permitió establecer las diferencias entre pares de geosistemas de manera cuantitativa.

La intención aquí era evaluar aquellas actividades dominantes en cada geosistema y que representaran más potencial de pérdida económica. La aproximación pudo hacerse de forma cuantitativa, con la información disponible, pero sólo en términos de grandes sectores productivos. Hubo tres casos

(manglares, playas y dunas) para los que no se reportan datos, por ello se consideraron de mínima vulnerabilidad.

Para esta variable el criterio empleado fue: a mayor proporción de población/geosistema dedicada a actividades primarias más secundarias, más vulnerable será ese geosistema, en términos de que, en caso de derrame, las pérdidas económicas serían directas sobe estos dos sectores.

8.4.2. Aplicación del método AHP

Se construyó el modelo jerárquico (figura 6). De acuerdo a él y al objetivo de este estudio, el primer paso consistió en identificar las variables para evaluar la vulnerabilidad, considerando las características de los medios físico, biológico y socioeconómico del área de estudio. El siguiente paso fue la identificación de los diferentes geosistemas presentes en dicha área. En este caso se identificaron 11 geosistemas para llevar a cabo el ejercicio de AHP.

Aplicando el AHP, se realizaron las comparaciones pareadas entre las variables seleccionadas para obtener los pesos de cada una de ellas en la evaluación de toda el área. Cabe aclarar que se tenía una propuesta previa, acordada con el INE, para ajustar lo más posible estos valores a la fórmula 40% medio físico, 40% medio biológico y 20% medio socio-económico. Ésto dado que es prioridad de esta institución procurar la conservación y protección de los recursos naturales. Asimismo, se realizaron las comparaciones pareadas para los 11 geosistemas en función de cada una de las variables analizadas. Con estos valores se construyó una serie de matrices (una para cada variable), cuyas dimensiones corresponden a los 11 geosistemas considerados.

La escala empleada en las comparaciones por pares fue la sugerida por Banai-Kashani (1989) para llevar a cabo “juicios cuantificados”, la cual se basa en el uso de una escala de 9 puntos para asignar un número que, entre mayor sea,

representará una mayor diferencia al comparar dos elementos. Normalmente, se prefiere el uso de los nones; así, un 1 indica que los dos elementos son iguales, un 3 que existe una leve diferencia entre ellos, y así hasta llegar al 9, que establece la máxima diferencia entre los dos elementos que se comparan. Las matrices de valores pueden verse en el anexo 6.

Las matrices se resolvieron, obteniendo un puntaje o peso para cada una de las variables consideradas (pendiente-relieve, permeabilidad, riqueza, singularidad, fragmentación, índice de marginación e índice de actividad productiva); así como puntajes o pesos para cada geosistema en función de estas ocho variables. Se verificó que el índice de inconsistencia en cada una de las matrices fuera menor al 10% (Saaty, 1980). Los valores se incluyen en cada una de las matrices.

Finalmente, cada peso de cada geosistema se multiplicó por el peso de su correspondiente variable y se sumaron los valores ponderados de los diferentes factores para obtener la calificación final por geosistema. Estas calificaciones finales permitieron establecer la secuencia de vulnerabilidad que se muestran en la sección 7.3. Para establecer los “puntos de corte” entre vulnerabilidades II, IV y V se recurrió a normalizar los valores menores en función del mayor valor obtenido por variable y dividir ese intervalo en 3 categorías. Como se mencionó en la introducción los valores o series de vulnerabilidad obtenidos, deberán ser analizados en su contexto específico. Esto es, pertenecen a un área que, a una escala nacional, podría ya pertenecer a una categoría altamente sensible.

Considerando que la información obtenida a través de este tipo de análisis puede ser útil y ajustada a problemas particulares, se generaron por separado tres mapas complementarios: uno de sensibilidad del medio físico, otro de sensibilidad del medio biológico y otro más de sensibilidad del medio socioeconómico. Esos mapas pueden sobreponerse, asignando pesos diferentes a los asignados en este trabajo y generando así diferentes escenarios.

Por último, se sobrepusieron el mapa de vulnerabilidades I y II (criterios de exclusión *a priori* + hidrografía y geomorfología flluvial) con el derivado del proceso de análisis jerárquico (vulnerabilidades III, IV y V) para integrar el mapa final de sensibilidad ante derrames de petróleo crudo.

9. Resultados

9.1. Zonas prioritárias

La selección de la región de Coatzacoalcos, Veracruz, como área de estudio se basó en su importancia estratégica desde diferentes puntos de vista:

- Esta región se ubica en el Istmo de Tehuantepec, por ello tiene contacto directo con dos puertos importantes a nivel nacional, Coatzacoalcos y Salina Cruz, los cuales abastecen de petróleo y sus derivados por cabotaje a las zonas del Golfo de México y Pacífico, respectivamente.
- Esta región concentra, en un espacio reducido, la mayor infraestructura de petroquímica básica de país y genera el 98% de la producción en dicho rubro (PEMEX, 2006).
- Es la zona donde convergen todos los ductos del país, a través de los cuales se distribuye el petróleo y gas de las zonas productoras del Golfo de México hacia las regiones industriales.
- La Terminal Marítima de Pajaritos constituye el puerto petrolero más importante del país, por la diversificación y el volumen de los productos que maneja.
- Esta área representa una sensibilidad ambiental muy alta ante fenómenos peligrosos de origen natural y antropogénico como se reporta en el Atlas regional del Istmo de Tehuantepec (Oropeza y Enríquez, 2003)
- Está caracterizada por una alta complejidad y fragilidad de los ecosistemas costeros en el trópico húmedo. Además de una amplia gama de ambientes acuáticos (esteros, áreas inundables y semiinundables, lagos interiores, ríos) (Toledo, 1982) y como una zona altamente productiva y compleja, ecológicamente estable, pero frágil y con numerosas fronteras (Day y Yáñez-

Arancibia, 1981 en Toledo, 1988).

En función del análisis espacial del territorio nacional, que nos muestra la distribución de la infraestructura petrolera, los principales centros de población y las áreas naturales protegidas, y la escasa información que pudo recopilarse acerca de las estadísticas de los derrames, se llegó a la conclusión que el área de estudio seleccionada constituye uno de los ejemplos más complejos y representativos para abordar esta problemática.

9.2. Cambio en el uso del suelo en el área de estudio

Como resultados principales del análisis temporal de las imágenes de satélite empleadas en este estudio destacó el incremento de la clase “zona urbana” en el periodo 1972-1986 y posteriormente el mantenimiento de un crecimiento casi constante. Asimismo, la clase “mangle” sufre una reducción en el periodo 1986-1990, pero de manera importante hacia el 2000. El porcentaje correspondiente a la clase “pastizales” se mantiene relativamente constante pero tiene un cambio significativo en la imagen del año 2000. Por su parte, la clase “plantaciones” tiene ligeras variaciones, oscilando alrededor del 14%. Finalmente, las clases “agua-transición” y “cuerpos de agua” poseen un porcentaje bajo de píxeles y con cambios relativamente pequeños.

9.3. Descripción de los geosistemas

En el área de estudio se diferenciaron las unidades territoriales denominadas geosistemas, mismas que constituyen la base para evaluar el grado de sensibilidad ambiental y vulnerabilidad ante el impacto que puedan ocasionar los derrames de petróleo. Los geosistemas se describen brevemente de acuerdo con la situación global que presentan, destacando los aspectos relevantes, tomando como base el análisis realizado a partir del Atlas Regional de Istmo de Tehuantepec (Oropeza *et.al*, 2003), entre otros documentos. Éstos se clasificaron

de manera jerárquica en cuatro órdenes como se muestra en la figura 7 y su distribución espacial se representa en la figura 8. De las unidades caracterizadas se describen las correspondientes al cuarto orden que en total suman 22.

ORDEN	1	2	3	4
Geositemas Principales	Geosistemas Antropogénicos (Transformados)	Tecnógenos	Industriales	1. Petroleros
				2. Mineros
				3. Portuarios
				4. Agrarios/Pecuarios
			Urbano, Urbano/Rurales, Rural/Urbanos y Rurales	5. Sector Primario
				6. Sector Secundario
				7. Sector Terciario
			Hidráulicos	8. Embalses
		Agrarios	Agricultura de Humedad	9. Cultivos Anuales (Maíz....)
			Agricultura de Temporal	10. Cultivos Anuales (Maíz, Yuca....)
				11. Cultivos Semipermanentes y Permanentes (Naranja, Caña de Azúcar, Papaya, Cocotero)
				12. Cultivos Permanentes (Plantaciones Forestales e Industriales: Eucalipto, Hule, Palma de Coco Africana).
				13. Patizales Cultivados e Inducidos
	Mixtos			14. Combinaciones de todo tipo de Geosistemas
	Geosistemas Naturales y Semitransformados	Terrestres	Factores Bioclimáticos	15. Selva Alta y Mediana Perennifolia con Vegetación Secundaria
			Factores Hídricos	16. Lagunas y Ríos
			Factores Hidrodinámicos	17. a) Planicie Acumulativa Fluvio-Lacustre y Palustre (Con Vegetación Hidrófila y Pastizales Inundables)
				17. b) Planicie Acumulativa de Bajos Inundados Permanentemente (Con Vegetación Hidrófila)
		Transicionales (Interfase)	Factores Morfodinámicos (Costas y Planicies Costeras)	18. Planicies Acumulativas Costeras
				19. Costa Acumulativa (Playas Arenosas)
				20. Lagos y Lagunas Costeras, Esteros
				21. Manglares
		Marinos	Nerítico	22. Plataforma Continental con Sedimentos Terrígenos

Figura 7. Diferenciación de los geosistemas.

Los geosistemas de primer orden, referente a los antropogénicos o transformados, se dividen en dos grupos. El primero concierne a los geosistemas tecnógeno-industriales (segundo y tercer orden) que incluye a los petroleros, mineros, portuarios y agropecuarios; éstos últimos corresponden a granjas, particularmente las avícolas (cuarto orden); tecnógeno-urbanos, urbano-rurales, rural-urbanos y rurales; y los hidráulicos.

En el segundo grupo de los antropogénicos se encuentran los agrarios (segundo orden), divididos en agricultura de humedad (con cultivos anuales-cuarto orden) y agricultura de temporal (tercer orden), que a su vez se subdivide en cultivos anuales, cultivos semipermanentes y permanentes, cultivos permanentes, y

pastizales cultivados e inducidos.

9.3.1. Geosistemas tecnógeno industriales

En este grupo se encuentran los geosistemas petroleros, portuarios, mineros y agropecuarios (industrias de alimentos balanceados y granjas avícolas), necesitan grandes insumos de energía artificial para su funcionamiento que básicamente depende de los hidrocarburos.

Geosistemas petroleros y portuarios

El crecimiento demográfico y urbano de los geosistemas petroleros fue una respuesta lógica a la elevada demanda de trabajadores que PEMEX y las empresas privadas requirieron para la construcción de nuevos complejos petroquímicos y la edificación de infraestructura apropiada para esta actividad, desde el decenio de los sesenta. El mayor impacto demográfico se manifestó con la construcción del complejo Pajaritos, la apertura y modernización del paso al sureste y el conjunto de muelles porteños durante el periodo 1960-70. Durante los ochenta, continuó la construcción de plantas de petroquímica secundaria privadas y a partir de 1988 inició la construcción de unidades habitacionales destinadas a los obreros que laboraban en actividades petroleras.

En paralelo, se implantaron asentamientos irregulares carentes de planeación, por lo que espacialmente se observa una marcada segregación urbana con poblaciones que reflejan altos y medios índices de marginación (La Cangrejera (Gavilán Sur) y Mundo Nuevo, respectivamente) susceptibles de sufrir daños por su cercanía a las instalaciones industriales, áreas que si bien presentan bajos índices de marginación (como Allende y Coatzacoalcos), por la densidad de población y las características de su ubicación, las convierten en zonas de muy alta vulnerabilidad.

En todos los casos se presentaron movimientos migratorios de áreas rurales aledañas y de otras entidades con experiencia petrolera, que hicieron crecer el área urbana de las cabeceras municipales.

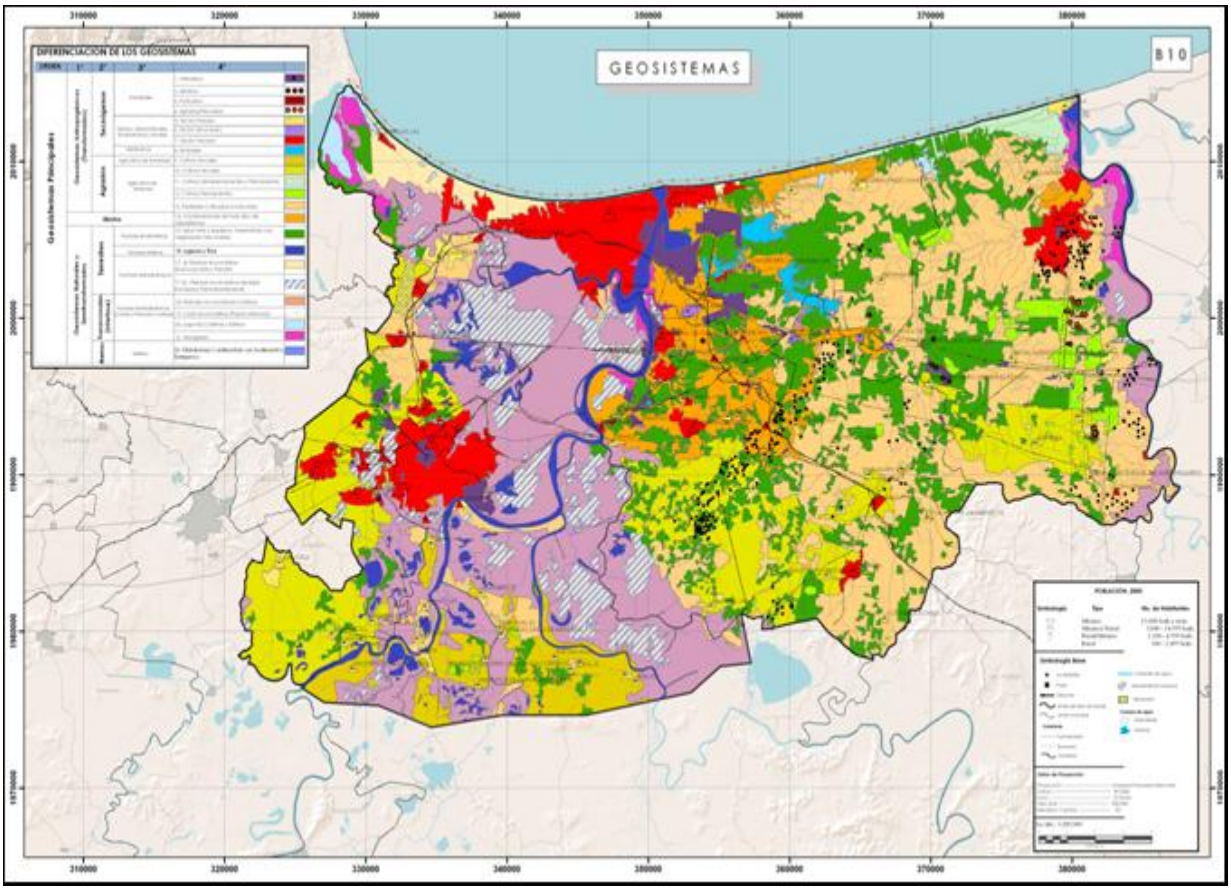

Figura 8. Mapa de geosistemas.

Geosistemas mineros

Están representados por las canteras, salinas y sistemas extractivos de minerales no metálicos, como el cuarzo, las gravas silícicas, el azufre, los nitratos, las sales de potasio y la sal común (cloruros y bicarbonatos de sodio) (Sánchez *et al.*, 2003). Se localizan en localidades rurales que carecen de servicios básicos de los municipios de Nanchital y Agua Dulce, donde predominan índices de marginación bajos, en virtud de las bajas remuneraciones obtenidas en este tipo de actividad.

Geosistemas industriales agropecuarios

Debido a la vocación agrícola del municipio de Agua Dulce y por ende, a la PEA ocupada en el sector primario, se ha instalado una serie de industrias orientadas a la producción de alimentos balanceados destinados al consumo animal. Las

localidades rurales (menores a 2,500 hab.) presentan índices altos de marginación y, aunado al paso importante de oleoductos, son considerados vulnerables ante un evento de derrame, sobre todo en lo relativo a sus actividades económico-productivas que dependen de la aptitud del suelo. En este grupo también se incluyen las granjas avícolas, que se distribuyen en dicho municipio.

Los geosistemas tecnógeno-industriales por ser los más transformados, por constituir un peligro y a la vez ser muy vulnerables, por tener muchos de ellos una expresión cartográfica puntual (pozos petroleros, minas y granjas) y dado el enfoque de este estudio, no se evalúan.

9.3.2. Geosistemas tecnógeno urbanos, urbano-rurales, rural-urbanos y rurales

El segundo grupo de los geosistemas tecnógenos de primer orden (antropogénicos) considera a los geosistemas urbanos, urbano-rurales, rural-urbanos y rurales (cuarto orden).

Estos geosistemas se diferencian por el tamaño de su población y por la función principal, establecida por la predominancia de la actividad económica por sector y determinada por el mayor porcentaje respecto a la población ocupada (INEGI, 2001).

Por su tamaño, en la zona de estudio existen 6 ciudades clasificadas como geosistemas urbanos (con población mayor a 15,000 habitantes), corresponden a: Cosoleacaque, Allende, Nanchital, Coatzacoalcos, Agua Dulce y Minatitlán. Geosistemas urbano-rurales hay 5 (Coacotla, El Naranjito, Nuevo Mundo, Ixhuatlán del Sureste y Cuichapa), rural-urbanos son 3 (San Pedro Mártir, Estero del Pantano y Mapachapa) y los rurales incluyen a 91 localidades.

De acuerdo a la función principal 26 localidades desarrollan actividades terciarias,

entre las que destacan el comercio, los servicios, el transporte y la administración pública (Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, 2005). Ocho, realizan actividades secundarias, como son la industria extractiva (petróleo y gas), de la construcción y de la transformación; y 71 localidades rurales llevan a cabo actividades primarias (agricultura y ganadería, pesca y forestales). La tendencia que se observa es el incremento de las actividades industriales y comerciales (Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, 2005).

En los geosistemas urbanos ocurren las mayores transformaciones, han perdido su carácter natural al aumentar sus necesidades de insumos artificiales para generar sus principales procesos productivos, también a partir de fuentes como los hidrocarburos y sus derivados. La expansión territorial se está dando aceleradamente en detrimento de los geosistemas naturales como la planicie acumulativa costera con cordones de dunas y la planicie acumulativa fluvio-lacustre y palustre.

En ellos se concentra la problemática ambiental relacionada con la contaminación de aire (y auditiva), agua y suelo, particularmente en Coatzacoalcos, Minatitlán y Nanchital. Mientras que en los geosistemas urbano-rurales, rural-urbanos y rurales predomina la contaminación del agua y del suelo. Cabe señalar que, de acuerdo con la metodología utilizada, las poblaciones mayores a 15,000 habitantes automáticamente quedan en el rango de vulnerabilidad muy alta (nivel I) ante la ocurrencia de derrames de petróleo. El resto de las localidades se incluyen en el análisis de vulnerabilidad socioeconómica únicamente en función de los geosistemas en los que se encuentran.

9.3.3. Geosistemas tecnógeno hidráulicos

Corresponden a los embalses artificiales, como presas, estanques y bordos. En el área de estudio los más importantes son La Cangrejera, Carolina Anaya, Gavilanes (Cangrejera Dos) y Pajaritos (Vaso Uno). Igualmente y conforme a la

metodología aplicada, estos cuerpos de agua se excluyen del análisis jerárquico y se les cataloga con una vulnerabilidad muy alta (nivel I) toda vez que, el agua es el vehículo principal en la dispersión del petróleo.

9.3.4. Geosistemas agrarios

Agrupan a la agricultura de humedad con cultivos anuales, a la agricultura de temporal, subdividida en cultivos anuales, cultivos semipermanentes y permanentes, y a los pastizales cultivados e inducidos.

Los geosistemas agrarios tienen una amplia distribución, dependen para su funcionamiento de la energía solar y de las condiciones del suelo. Aunque en menor proporción que los geosistemas clasificados como tecnógenos, éstos también necesitan energía artificial proporcionada mediante insumos agroquímicos. Actualmente se expanden rápidamente a expensas de las selvas y otros tipos de vegetación. Estos geosistemas presentan una vulnerabilidad global moderada y alta (Oropeza y Enríquez, 2003) que depende de múltiples factores, incluyendo la variedad de cultivos, las condiciones ambientales, culturales e históricas del área y las políticas de mercado nacionales e internacionales. Por otra parte, de manera específica, su vulnerabilidad respecto a los derrames se clasifica desde muy baja (nivel V) hasta moderada (nivel III).

Agricultura de humedad con cultivos anuales

Este tipo de agricultura se ha desarrollado aprovechando la humedad natural aportada por las planicies acumulativas fluvio-lacustres y palustres, se distribuye al suroeste y abarca una superficie aproximada de 60.5 km^2. Los principales cultivos que produce son: maíz, arroz, chile, pepino y otras hortalizas. Intercalados entre los cultivos mencionados también se desarrollan caña de azúcar y pastizales, que por la escala de trabajo no se separaron como unidades independientes.

Las localidades rurales que se ubican en este geosistema están conformadas por

una población total de 1,919 habitantes y una PEA ocupada de 1,023 habitantes, de la cual 82% se dedica a las actividades primarias y un 12% a los servicios requeridos por dicha actividad. Debido a que la actividad es poco redituable, a que los índices de marginación de estas comunidades son altos (88% de los habitantes) y medios (12%), aunado a una densidad de PEA primaria considerable: 264 hab/km^2, la población es muy vulnerable ante los derrames de petróleo crudo, no así el geosistema en el que se ubican pues éste resulta con una sensibilidad ambiental baja respecto al medio socioeconómico.

Agricultura de temporal con cultivos anuales

Estos geosistemas se consideran como agricultura de temporal porque dependen de las lluvias estacionales para su desarrollo; se distribuyen ampliamente hacia el sur y cubren una superficie de 642.60 km^2, equivalente al 36.19% del total del área de estudio.

De los cultivos de temporal anuales, la producción de granos, como maíz, arroz, sorgo y fríjol, es la más importante. Cabe señalar que el sistema tradicional de rosa, tumba y quema continúa siendo una práctica común. Este sistema se emplea para abrir terrenos que se dedican al cultivo de maíz, frijol, calabaza, camote y yuca, para consumo doméstico. Una vez que los suelos se han agotado, las parcelas se dejan descansar por periodos de más de cinco años (García *et al*., 2005).

La población total de 7,956 habitantes que conforma esta unidad se localiza de forma aislada en la zona de estudio, pero con una gran concentración al interior (687 hab/km^2). De la PEA ocupada total (1712 habitantes), 69% se ubica en el sector primario. En virtud del tipo de agricultura, las poblaciones rurales localizadas en este geosistema, como en el resto del país, presenta niveles ínfimos de calidad de vida. Los índices de marginación se agrupan en muy altos (37%) y altos (39%); por lo que se consideran dentro de la máxima vulnerabilidad con respecto a los posibles derrames de petróleo crudo; sin embargo, su

sensibilidad socioeconómica en el contexto del geosistema al que pertenecen resulta moderada.

Agricultura de temporal con cultivos semipermanentes y permanentes

Dentro de este tipo de geosistemas se agrupan los terrenos que se dedican a los cultivos de caña de azúcar, piña, cítricos (limón y naranja), papaya, plátano, mango, tamarindo, café y coco. Asimismo, entre estos cultivos se intercalan maíz frijol y otros más. La superficie más importante con estos cultivos se localiza al noroeste, en el Municipio de Agua Dulce, con aproximadamente 13.86 km^2.

Agricultura de temporal con cultivos permanentes

Estos geosistemas abarcan un área de 22.48 km^2, incluyen las plantaciones forestales e industriales de eucalipto, hule y palma de coco africana.

El cultivo del eucalipto es una práctica que se ha ido consolidando, sobretodo en lomeríos o terrenos con leve inclinación. Las plantaciones más importantes se encuentran próximas a los caminos y carreteras en el Municipio de Agua Dulce (INE-IMP, 1997; García *et al*., 2005).

El cultivo del hule también se encuentra en franca expansión. En estos cultivos, lo cerrado del estrato arbóreo permite la conservación de los suelos, aún cuando el estrato arbustivo se elimine para facilitar el rayado y la recolección del látex (figura 9) (INE-IMP, 1997). Las plantaciones de palma de coco africana igualmente se están expandiendo debido a las demandas del mercado nacional e internacional.

En los dos últimos geosistemas, la reducida población (152 habitantes) residente, presenta en su totalidad un alto índice de marginación, ello se explica por la temporalidad y la variedad de los cultivos. La PEA ocupada en el sector primario refleja casi un 50% del total de la población. No obstante lo anterior, su vulnerabilidad global como específica en todos los casos es muy baja.

Figura 9. Plantación de hule localiza cerca de las localidades de Plan de la Ceiba y Francisco de Garay.

Pastizales cultivados e inducidos

En estos geosistemas se incluye a todo tipo de praderas (pastizales cultivados e inducidos, mezclados con palmares o acahuales, y sabana) suficientemente grandes para representarse cartográficamente como unidades independientes. Las praderas inducidas son consecuencia del desmonte de áreas cubiertas originalmente con selvas. Algunas de ellas primero fueron utilizadas con fines agrícolas, pero actualmente se destinan a la ganadería intensiva y extensiva con fines comerciales de especies criollas de bovinos (INE-IMP, 1997).

En las praderas cultivadas la ganadería de bovinos tiene un doble propósito, la producción de leche y de carne. En estas zonas la problemática ambiental y de riesgos se relaciona con: las plagas, la deforestación de los pocos árboles que quedan, el sobrepastoreo, la erosión del suelo, la contaminación por agroquímicos; y las sequías, los incendios y las inundaciones (Oropeza y Enríquez, 2003a).

Abarcan grandes extensiones de los municipios de Agua Dulce y Moloacán y una porción del noroeste de Coatzacoalcos (396km^2). Debido a las rugosidades del terreno y al uso intensivo del suelo para actividades productivas, los asentamientos humanos son reducidos y sólo cuentan con una población total de 4,980 habitantes de los cuales 43% se clasifica como terciario, 26% secundario y

el 26% restante primario, todos ellos dirigidos a la ganadería. El carácter comercial de la actividad indica que está concentrada en pocos dueños, por lo que 90% de la población total originaria refleja un alto índice de marginación: con nulos servicios básicos, estudios de primaria y salarios mínimos; características que hacen a la población de este geosistema vulnerable ante riesgos industriales.

9.3.5. Geosistemas mixtos

Corresponden al conjunto de geosistemas que por la escala de trabajo no se pueden delimitar por separado, ya que forman un mosaico muy heterogéneo. Esta categoría tiene una superficie de 100.6 Km^2 y se distribuye entre la zona industrial y su periferia; agrupa geosistemas naturales, semitransformados y transformados. En ellos se incluyen principalmente grandes lotes o predios baldíos, pequeños relictos de selvas, vegetación en proceso de degradación (acahuales), pastizales cultivados e inducidos, cultivos de temporal y campos de explotación del petróleo. La superficie cubierta por los geosistemas mixtos es reflejo de una dinámica acelerada cuya fragmentación se debe al cambio de uso del suelo. En estos geosistemas se conjuga todo tipo de problemas ambientales pues están sujetos a plagas y enfermedades, inundaciones, sequías, incendios forestales y contaminación de suelo, agua y aire; entre otros (Oropeza y Enríquez, 2003b).

Los 1,922 habitantes que se agrupan en localidades rurales y rural/urbanas se distribuyen de manera aislada y aledaña a zonas urbano-industriales, por lo que sus sectores productivos reflejan una diversificación, con predominio en el terciario (39%). No obstante, 78% de dicha población presenta un alto índice de marginación, lo que indica que son actividades terciarias no especializadas.

A pesar de lo anterior, para los efectos de esta investigación, la sensibilidad de este geosistema ante el impacto que puedan provocar los derrames de petróleo crudo se evaluó en baja (nivel IV) y muy baja (nivel V).

9.3.6. Geosistemas naturales y semitransformados terrestres

Los geosistemas pertenecientes al grupo de los naturales y semitransformados (manifiestan algún tipo de influencia humana) dependen para su funcionamiento de la energía proporcionada por la propia naturaleza. Se dividen en terrestres, transicionales y marinos.

A su vez, los geosistemas terrestres se diferencian de acuerdo a factores bioclimáticos en selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria; de acuerdo a factores hídricos en lagunas y ríos, de acuerdo a factores hidrodinámicos en planicie acumulativa fluvio-lacustre y palustre con vegetación hidrófila y pastizales inundables y planicie acumulativa de bajos inundados permanentemente con vegetación hidrófila.

Geosistemas de selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria
Los geosistemas más representativos del área, identificados por factores bioclimáticos corresponden a las formaciones de selvas altas y medianas perennifolias. En ellos se incluyen las superficies mejor conservadas, ya sea como selvas primarias o secundarias, así como pequeños núcleos de selvas inundables y de vegetación secundaria o acahuales en diversos estados sucesionales. Estos geosistemas cubren una superficie aproximada de 270.55 Km^2 y su distribución más amplia se localiza entre los Ríos Coatzacoalcos y Tonalá.

Los geosistemas de selvas presentan diferentes grados de deterioro ambiental, dado por factores naturales y humanos; son de los más amenazados porque, a costa de ellos, se están ampliando las fronteras agrícolas, pecuarias, industriales, urbanas y turísticas. Entre los peligros más frecuentes que enfrentan se encuentran la tala inmoderada, los incendios forestales naturales y provocados por el hombre (accidental o intencionalmente) y la extracción de flora y fauna, además de la cacería furtiva (Oropeza y Enríquez, 2003 y 2003b).

Ubicadas entre los ríos mencionados, las poblaciones rurales conformadas en su totalidad por 2,235 habitantes, son altamente vulnerables ante las transformaciones productivas actuales de la industria, centros urbanos, actividades recreativas y agrícolas. Así lo muestra su alto índice de marginación donde se concentra el 95% de su población y el 61% en actividades primarias.

La vulnerabilidad ambiental global como específica de los geosistemas de selva se clasificó como moderada (nivel III) respecto a los efectos de los derrames de hidrocarburos.

Geosistemas de lagunas y ríos

Los geosistemas terrestres diferenciados por factores hídricos se refieren a los cuerpos de agua continentales (lagunas y ríos) que no tienen influencia marina o ésta es menor que en las lagunas próximas a las costas y desembocaduras de ríos. Estos geosistemas son muy sensibles a la acción humana, la cual se manifiesta a través de múltiples impactos como son: la contaminación por fugas y derrames de hidrocarburos, por agroquímicos y por desechos municipales e industriales (Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, 2005); la sedimentación o azolve por efectos de la erosión de sus cuencas, por mencionar los más importantes.

En el área de estudio, los cuerpos de agua más significativos forman parte de la cuenca baja del complejo sistema fluvial de Río Coatzacoalcos. Las lagunas que se incluyen dentro de este grupo de geosistemas son: El Tepache, Colorada, Las Matas, El Tepejilote y las Lagunas de Coachapa, así como otras más sin toponimia en la cartografía. En casi todas ellas se presentan problemas de contaminación y eutroficación en mayor o menor grado (INE-IMP, 1997).

Como geosistemas fluviales se tomaron en cuenta las dos corrientes principales que mantienen un flujo permanente, que son los ríos Coatzacoalcos y Tonalá y sus afluentes de carácter perenne o estacional que son representativos a la escala

de trabajo. Para el Río Coatzacoalcos los afluyentes son: el Arroyo Calzadas y el estero del Pantano, Huazuntlán y San Francisco, por la margen izquierda, y Uxpanapa, Teapa, Arroyo Blanco, Coachapa y San Antonio, por la margen derecha. Por su parte, para el Río Tonalá los afluentes son: Agua Dulce, Agua Dulcita, Tepexcuintle y El Arenal, todos por la margen izquierda. En sedimentos de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá se han encontrado niveles importantes de hidrocarburos y metales pesados (Zárate *et al.*, 2001).

Las lagunas y ríos se clasifican con una vulnerabilidad ambiental muy alta (nivel I) Pues como ya se señaló, el agua constituye el principal medio de dispersión del petróleo.

Geosistemas de planicies acumulativas

Estos se dividen en planicies acumulativas fluvio-lacustres y palustres, con vegetación hidrófila y pastizales inundables, y planicies acumulativas con bajos inundados permanentemente, con vegetación hidrófila (figura 10).

Figura 10. Planicie fluvio-lacustre en el Municipio de Agua Dulce.

La superficie más importante de estos geosistemas, por su extensión, corresponde a la cuenca baja del Río Coatzacoalcos y le sigue la cuenca baja del Río Tonalá. Tiene un área aproximada de 403.7 Km^2, 22% de cubrimiento respecto al total del área de estudio.

Se ha determinado la restricción del crecimiento poblacional hacia estas zonas por considerarlas muy vulnerables (Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, 2005). Para este análisis, las planicies fluvio-lacustres y palustres resultan con una sensibilidad alta (nivel II), y muy alta (nivel I) para las planicies acumulativas con bajos inundados permanentemente.

9.3.7. Geosistemas naturales y semitransformados transicionales

Los geosistemas transicionales o de interfase están definidos por factores morfodinámicos. A ellos pertenecen las costas y planicies costeras. En este grupo se consideran las planicies acumulativas costeras, la costa acumulativa, el litoral conformado por playas arenosas, las lagunas costeras, los esteros y los manglares. En todos ellos hay un marcado intercambio de materia y energía que se lleva a cabo a través de procesos físicos, biológicos y socioeconómicos entre los geosistemas terrestres y los marinos; por tanto, las alteraciones que se den en ambos tipos de geosistemas repercuten invariablemente en los geosistemas de transición. Estos últimos mantienen una morfodinámica fundamentalmente relacionada con las mareas y las corrientes marinas y fluviales.

Geosistemas de planicies acumulativas costeras

Corresponden a los sistemas de dunas y cordones litorales, que son importantes por su singularidad, complejidad y su gran dinamismo. Están constantemente cambiando en respuesta a las fuerzas naturales y humanas dentro de una gran variedad de escalas temporales (French, 1997) y juegan un papel esencial en el equilibrio ecológico y en los aportes de sedimentos de los ambientes costeros (Paskoff, 1989). Prestan numerosos servicios ambientales a la sociedad, pues

cumplen diversas funciones como: hábitats especializados para la flora y fauna, áreas para desarrollos habitacionales y turísticos, fuentes de extracción de materiales. Tienen además un alto valor recreativo (Moreno-Casasola, 2004).

Estas planicies costeras están cubiertas por vegetación propia de dunas costeras o plantas pioneras, además de diversos tipos de matorrales y pastizales.

Las principales amenazas que impactan a estos geosistemas son de origen natural y antropogénico, aunque también se combinan, pues el hombre induce o acelera varios procesos peligrosos naturales a través de sus actividades. Entre las primeras cabe mencionar a los ciclones tropicales y los Nortes, los procesos de erosión/sedimentación, las sequías y los incendios forestales, entre otras. En cuanto a las amenazas de origen humano se destacan los cambios de uso del suelo (figura 11) y la consecuente degradación o pérdida de la vegetación, la contaminación de suelo, agua y aire y la erosión antropogénica de la costa, por mencionar las más importantes.

Estos geosistemas, en tanto que unidades naturales y semitransformadas, sólo se distribuyen al oeste de la ciudad de Coatzacoalcos; en dirección a la laguna de Ostión, las localidades rurales y urbano/rurales se integran de 6,772 habitantes con índices bajos de marginación. La sensibilidad global a los derrames de petróleo se ha determinado en un grado bajo (nivel IV).

Geosistemas de costas acumulativas

Las costas acumulativas están representadas por playas arenosas, cuyo proceso dominante, como su nombre lo indica, es la acumulación de sedimentos que originan una morfología de dunas, cordones litorales y bermas.

Las playas arenosas presentan diferentes grados de alteración provocada por las actividades humanas. Son afectadas por la contaminación derivada de las operaciones de carga y descarga del petróleo crudo y por los derrames

accidentales. En ellas se arrojan además breas, alquitranes, aceites, grasas, sólidos orgánicos, desechos municipales y aguas residuales (SEMAR, 1991). En general, la contaminación por desechos orgánicos e inorgánicos se observa en todas las playas. Entre los fenómenos naturales que causan daños a este tipo de geosistema de costa se encuentran fundamentalmente los eventos hidrometeorológicos extremos como los Nortes y huracanes debido a sus efectos directos e indirectos (viento, oleaje, mareas de tormenta e inundaciones). Pese al deterioro que muestran, en el análisis de vulnerabilidad realizado globalmente resultan con un valor bajo (nivel 4).

Geosistemas de lagunas costeras y esteros

Estos geosistemas comprenden principalmente a las lagunas o complejos lagunares y esteros, los cuales son semicerrados pues mantienen una conexión libre con el mar. Éstos incluyen a la Laguna de Ostión y la de Tortuguero, situadas al oeste y al este de la ciudad de Coatzacoalcos respectivamente, y pequeños esteros.

Figura 11. Destrucción de dunas para la construcción de asentamientos humanos al oeste la ciudad de Coatzacoalcos.

Prácticamente, estas lagunas y esteros limitan o se encuentran dentro de los

campos de dunas y cordones litorales. En trabajos previos se estiman con una vulnerabilidad global alta y muy alta, dadas sus características inherentes y los impactos externos a los que están expuestos (Oropeza y Enríquez, 2003). Según Zárate y colaboradores (2001), en la Laguna Ostión la actividad petrolera ha generado serios problemas de contaminación por hidrocarburos.

En el presente análisis de vulnerabilidad ante los derrames de petróleo crudo también se clasificaron con un grado muy alto (nivel I).

Geosistemas de manglares

Los manglares, por sus características intrínsecas, constituyen geosistemas muy frágiles a la vez que cumplen funciones ambientales muy importantes, pues son estabilizadores de la línea de costa y la protegen contra el embate de los huracanes. Asimismo, son altamente productivos, permiten el desarrollo de numerosas especies de animales como peces, crustáceos y moluscos, así como de reptiles, mamíferos y aves.

Las comunidades más representativas de manglares se distribuyen en los bordes de la Laguna Ostión y en las márgenes del Río Tonalá, cerca de su desembocadura. También quedan pequeños núcleos en las márgenes del Río Coatzacoalcos. El área que cubren es de aproximadamente 19 km^2.

Los manglares están muy amenazados por el desarrollo de las actividades petroleras e industriales, agropecuarias y urbanas. Por un lado, sus superficies se reducen día con día debido a la deforestación y a la apertura de tierras para la ganadería; y por otro, sufren serios problemas de contaminación por derrames de hidrocarburos, vertimiento de aguas residuales (urbanas e industriales) y desechos sólidos, azolvamiento, extracción de gravas y arenas, obstrucción de flujos superficiales que disminuyen las mezclas de agua dulce y marina, por mencionar los más importantes (Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, 2005).

De acuerdo con la metodología aplicada para determinar la vulnerabilidad de los geosistemas de manglares ante los posibles impactos generados por los derrames de ductos de petróleo crudo se catalogaron con grado alto (nivel II).

9.3.8. Geosistemas naturales y semitransformados marinos

Estos geosistemas son los que conservan el mayor grado de naturalidad en comparación con los anteriores. En general se diferencian en neríticos y abisales. En este trabajo sólo se diferencia al geosistema nerítico que se identifica por las aguas someras que se encuentran por encima de la plataforma continental, en ésta la composición predominante es de sedimentos terrígenos proporcionados por las principales corrientes fluviales.

Uno de los principales problemas ambientales del geosistema nerítico es la contaminación marina que se deriva en gran parte de la actividad portuaria relacionada con el manejo de los hidrocarburos, así como de las descargas de aguas residuales industriales y domésticas (SEMAR, 1991). A pesar de lo señalado, no se realizó una evaluación de su vulnerabilidad ambiental respecto a los derrames de hidrocarburos, pues dados los objetivos de este trabajo, sólo se analizaron los geosistemas continentales y de transición.

9.4. Características del sistema de información geográfica

Para el estudio de sensibilidad del ambiente ante derrames de petróleo, es necesario trabajar con datos espaciales (cartografía digital), los cuales facilitan la automatización del procesamiento de la información obtenida, funcionando como herramienta de análisis.

Con base en lo anterior, se trabajó con información vectorial (puntos, líneas, polígonos), imágenes de satélite (SPOT Y LANDSAT) y modelos digitales de terreno (MDT), procesados en un sistema de información geográfica utilizando los

programas ArcGis 9 y ENVI 4, los cuales favorecen la captura, análisis y el manejo de la información. Para obtener una mejor precisión de los datos se trabajó con la proyección UTM Zona 15 norte con un Datum WGS84. El SIG tiene múltiples aplicaciones, por lo que se mencionarán las que se utilizaron.

Cartografía de base: permite la creación de mapas por medio de cartografía automatizada, captura de datos, macros y herramientas de análisis simples, tal es el caso de las cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000, para obtener los vectoriales de: vías de comunicación; cuerpos de agua; instalaciones portuarias, industriales y eléctricas; áreas urbanas y los equipamientos con que se cuenta.

Mapas cuantitativos: mapas de población que se utilizan para localizar lugares que reúnen ciertos criterios demográficos para tomar decisiones, o establecer las relaciones existentes entre diferentes lugares; en este caso se realizó un mapa con: el índice de marginación; la tasa de crecimiento y la evaluación de la PEA por sector de actividad, los cuales se explican en la sección correspondiente.

Mapas de densidades: permiten medir el número de entidades en una unidad de área uniforme, tal como el metro o el kilómetro cuadrado, para ver claramente la distribución. Este proceso se aplicó para el cálculo de la densidad de ductos por tipo de geosistema.

Cálculo de distancias: los SIG se pueden utilizar para saber qué está pasando en un radio determinado alrededor de una entidad. En este estudio, se aplicó este procedimiento para conocer la distancia de un ducto a otro, de una localidad a otra; o la distancia de los derechos de vía con los asentamientos humanos.

Cartografía y detección del cambio: se usa para cartografiar los cambios espaciales y temporales para predecir condiciones futuras, tomar decisiones, o evaluar los resultados de una acción o una política concreta y así detectar zonas no aptas para el desarrollo urbano y áreas sensibles ante derrames de petróleo.

El SIG se utilizó para el manejo de la información de base y la generación de los mapas de geosistemas, los de situación socioeconómica y, finalmente, los de sensibilidad ambiental ante derrames de petróleo crudo. En el anexo 7 se incluye una tabla con el inventario de los productos específicos, sus características, la información que sirvió de base para su elaboración, así como algunos señalamientos de las dificultades técnicas que se tuvieron que enfrentar, con relación a las características de la información disponible para lograr los propósitos de este trabajo. La simbología de los mapas finales, así como sus respectivos metadatos se incluyen igualmente en el anexo 7, así como en el cuerpo de cada uno de los mapas (anexo 2).

9.5. Matrices AHP

La matriz AHP de variables se construyó comparando de par en par la importancia relativa que se atribuyó a cada variable sobre las otras. Como ya se mencionó, por intereses propios del INE-SEMARNAT, se juzgaron más importantes tanto las variables que describen al medio físico como aquellas propias del medio biológico. Esta matriz mostró un nivel de inconsistencia interna aceptable (CI=6.1%, menor al 10%, valor considerado como aceptable de acuerdo a Saaty, 1987).

Los resultados del AHP de variables se muestran en la tabla 4, en donde se puede apreciar que la importancia relativa para las variables físicas fue de 19% aproximadamente, de 14% para las variables del medio biológico y de 11% para las dos variables del medio socioeconómico.

Una vez que se terminó el mapa de geosistemas con su respectiva descripción, se llevó a cabo una reordenación de los mismos, agrupando o seleccionando ciertos geosistemas.

Los geosistemas tecnógenos (unidades 1 al 8 del mapa de geosistemas, figura 8)

están consideradas como de vulnerabilidad I, en áreas excluidas *a priori*. De los geosistemas agrarios, se tomó la agricultura de humedad, de temporal con:

- Cultivos anuales (se les llamó agricultura de temporal).
- Cultivos semipermanente y permanentes.
- Cultivos permanentes (propiamente plantaciones).
- Pastizales cultivados e inducidos.

La categoría de geosistemas mixtos se conservó, así como la de selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria. Los ríos y lagunas se evaluaron por separado bajo el criterio de hidrología y geomorfología fluvial (categorías de vulnerabilidad I y II), así como la unidad 20 de lagunas costeras y esteros. Las dos unidades de planicies acumulativas (17a y 17b) se fusionaron para la evaluación AHP. La planicie acumulativa costera (18) se incluyó como dunas y la costa acumulativa (19) como playas. Los manglares se incluyeron como tales, pero la unidad 22 de la plataforma continental no se incluyó, ya que no se le aplican las variables seleccionadas y no forma parte de este estudio. De las 22 unidades identificadas, sólo se eligieron las 11 mencionadas anteriormente para la construcción de las matrices.

Las matrices resultantes (11 x 11) con sus respectivas calificaciones se presentan en el anexo 6, mismas que se resolvieron conforme a lo expuesto en la sección de metodología multiplicando por el peso de cada variable (tabla 2), cuidando de no rebasar el 10% de inconsistencia requerido. Se hicieron los cálculos para integrar las 7 secuencias de vulnerabilidad obtenidas por variable y se obtuvo el ordenamiento jerárquico (de mayor a menor vulnerabilidad) mostrado en la tabla 3.

A partir de estos puntajes o calificaciones, se obtuvo la siguiente secuencia de ordenamiento de mayor a menor vulnerabilidad ante derrames de petróleo:
selva > manglar > dunas > agricultura de temporal > playa > planicie > pastizal > geosistema mixto > cultivos permanentes (plantaciones) > agricultura de humedad > cultivos semi-permanentes y permanentes

Tabla 2. Pesos obtenidos por el AHP para las variables consideradas.

VARIABLE	PESO
Pendiente – Relieve	0.188
Permeabilidad	0.188
Riqueza	0.137
Singularidad	0.137
Fragmentación	0.137
Índice de Marginación	0.107
Actividades Productivas	0.107
LAMBDA	7.48
CI=	0.061

Las categorías de vulnerabilidad asignadas a cada geosistema por medio del AHP se muestran en el tabla 4. Complementariamente se anexan las tablas 5, 6 y 7 en las que se muestran las categorías de vulnerabilidad a las que se asignan los 11 geosistemas, considerando por separado y únicamente las dos variables del medio físico (tabla 5), con pesos asignados de 0.5 a cada una de ellas; las tres variables del medio biológico (tabla 6), con pesos asignados de 1/3 a cada una de ellas, y por último, las dos variables del medio socioeconómico (tabla 7), con pesos de 0.5 a cada una de ellas. Estos puntajes separados por tema, permitirán en casos futuros, asignar importancias (pesos) diferentes para cada uno de estos aspectos dependiendo de objetivos específicos y obtener escenarios alternativos al adoptado en el presente estudio.

Cabe mencionar que la metodología AHP pudo complementarse de manera satisfactoria con los criterios de geomorfología fluvial para la obtención de una representación más real ante el peligro de un derrame, ya que de acuerdo tan sólo a la evaluación AHP los manglares y los humedales de la zona (geosistema planicie) hubieran quedado clasificados con una vulnerabilidad menor a la de las selvas.

9.6. Mapas de sensibilidad ambiental

El mapa de vulnerabilidad del anexo 2 muestra el resultado final obtenido, una vez que se empataron los resultados de las cinco categorías de vulnerabilidad. En él se observa que efectivamente las zonas más vulnerables están determinadas por la dinámica del agua y corresponden a los bajos asociados a las corrientes de agua principales en la zona, mismos que albergan los recursos bióticos más valiosos y tal vez, aún rescatables.

El área estudiada es particularmente sensible a los derrames debido a su abundancia de agua (ríos, lagunas, zonas inundables y precipitación). Esta sensibilidad se manifiesta sobre todo en los ecosistemas propios de esta condición, tales como los manglares y humedales de diversos tipos.

Los manglares y humedales, cuyo valor ecológico es fundamental para preservar las zonas de transición marino-terrestres y cuya distribución es limitada en nuestro país, están seriamente amenazados en la zona de estudio, tanto por los posibles derrames de hidrocarburos como por otros procesos antropogénicos que incluyen la elevada tasa de urbanización y los asentamientos humanos irregulares que carecen de servicios básicos.

9.7. Propuesta metodológica para le identificación de sitios ambientalmente sensibles a los efectos de derrames de hidrocarburos

El propuesta metodológica incluye los siguientes pasos (figura 12):

1.- El primer paso consiste en definir claramente el objetivo, que en este caso se refiere a la identificación de sitios ambientalmente sensibles a los efectos de derrames de petróleo crudo.

2.- En un siguiente paso se debe caracterizar la vulnerabilidad del ambiente y para ello se propone la exclusión *a priori* de ciudades con una población mayor a 15,000 habitantes, las zonas declaradas como áreas naturales protegidas y los

cuerpos de agua, dadas sus características intrínsecas, se consideró argumento suficiente para ser incluidos la categoría I de vulnerabilidad más alta.

3.- Posteriormente, se deben identificar los indicadores de sensibilidad ambiental o vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos, que puedan evaluarse con la información disponible (referencias bibliográficas, bases de datos, cartografía) y adecuada a la escala de trabajo.

4.- Partiendo del punto anterior y de manera específica para el área de estudio, se identificaron a los cuerpos de agua y sus áreas de influencia (crecidas ordinarias y desbordes extraordinarios) como niveles altos de vulnerabilidad (niveles I y II), por su potencial de dispersar los derrames de petróleo crudo.

5.- Se reconocen las variables que tienen una influencia más o menos homogénea o generalizada para toda el área, tal es el caso del clima y la susceptibilidad a desastres de origen natural y antropogénico.

Tabla 3. Pesos obtenidos por AHP para cada variable en cada geosistema y calificación final.

Geosistema	Pendiente-relieve	Permeabilidad	Riqueza	Singularidad	Fragmentación	Índice marginación	Actividades productivas	Calificación global*
Agricultura de humedad	0.024	0.034	0.041	0.021	0.036	0.041	0.140	**0.044**
Agricultura de temporal	0.201	0.066	0.032	0.021	0.036	0.106	0.421	**0.119**
Cultivos semipermanentes y permanentes	0.045	0.066	0.019	0.021	0.036	0.041	0.041	**0.040**
Plantaciones	0.056	0.109	0.019	0.021	0.036	0.041	0.041	**0.050**
Pastizal cultivado	0.147	0.060	0.018	0.021	0.036	0.041	0.107	**0.065**
Mixto	0.059	0.055	0.095	0.047	0.017	0.116	0.041	**0.060**
Selvas y acahuales	0.289	0.141	0.296	0.228	0.085	0.442	0.041	**0.216**
Planicie	0.024	0.024	0.119	0.141	0.167	0.041	0.046	**0.077**
Dunas	0.092	0.236	0.079	0.126	0.167	0.046	0.040	**0.122**
Playa	0.045	0.183	0.073	0.080	0.085	0.041	0.040	**0.084**
Manglar	0.018	0.024	0.208	0.272	0.302	0.041	0.040	**0.123**

Tabla 4. Categorías de vulnerabilidad-sensibilidad IIII, IV y V y geosistemas que incluyen.

CATEGORÍA DE VULNERABILIDAD	GEOSISTEMAS INCLUIDOS
III	Selvas
IV	Manglar, Dunas, Agricultura temporal, Playa y Planicie
V	Pastizal cultivado, Mixto, Plantaciones, Agricultura de humedad, Cultivos semi-permanentes y permanentes

Tabla 5. Categorías de vulnerabilidad III, IV y V del medio físico y geosistemas que incluyen.

CATEGORÍA DE VULNERABILIDAD	GEOSISTEMAS INCLUIDOS
III	Selvas y Dunas
IV	Agricultura temporal, Playa, Pastizal cultivado y Plantaciones
V	Mixto, Cultivos semi-permanentes y permanentes, Agricultura de humedad, Planicie y Manglar

Tabla 6. Categorías de vulnerabilidad III, IV y V del medio biológico y geosistemas que incluyen.

CATEGORÍA DE VULNERABILIDAD	GEOSISTEMAS INCLUIDOS
III	Manglar y Selvas
IV	Planicie y Dunas
V	Playa, Mixto, Agricultura de humedad, Agricultura de temporal, Cultivos semi-permanentes y permanentes, Plantaciones y Pastizal cultivado

Tabla 7. Categorías de vulnerabilidad III, IV y V del medio socioeconómico y geosistemas que incluyen.

CATEGORÍA DE VULNERABILIDAD	GEOSISTEMAS INCLUIDOS
III	Agricultura de temporal y Selvas
IV	Agricultura de humedad
V	Mixto, Pastizal cultivado, Planicie, Dunas, Cultivos semi-permanentes y permanentes, Plantaciones, Playa y Manglar

6.- En el siguiente paso, se seleccionan las variables biológicas, físicas y socioeconómicas con las cuales se evalúan los geosistemas identificados en el área de estudio.

7.- Se establecen los niveles de vulnerabilidad III, IV y V, a través del proceso de análisis jerárquico (AHP).

Es importante recalcar que para evaluar las zonas en riesgo, es necesario adicionar a la información de vulnerabilidad obtenida en este estudio, la caracterización del peligro. Ésta última no quedó incluida como objetivo del presente estudio y ello se debió a varias razones, entre las más destacadas se cuenta la falta de información, donde se registren no sólo los aspectos de localización del sitio de ocurrencia (coordenadas), sino el área afectada e información asociada como qué se derramó, en qué cantidades, cuándo fue y estadísticas generales para su evaluación, lo mismo puede decirse de la infraestructura, en este caso específico, el tendido de ductos, no se logró tener acceso a esta información.

9.8. Aplicación de un modelo de comportamiento de derrame frente a condiciones específicas del medio

De acuerdo a los resultados obtenidos, los manglares y los humedales serían los sitios sobre los que se aplicarían modelos conceptuales y cartográficos para crear escenarios de comportamiento de posibles derrames de hidrocarburos. Considerando las variables biológicas (riqueza, singularidad y fragmentación), físicas (pendiente/relieve, permeabilidad), socioeconómicas (marginación y actividades productivas), tal vez complementados con otro tipo de información.

En principio, de acuerdo con las variables seleccionadas para esta etapa del estudio, es factible la creación de un modelo basado en la información incorporada al SIG y aplicarlo en escenarios con condiciones diferentes, por ejemplo, la

vulnerabilidad de algún geosistema de particular interés (por ejemplo manglares o zonas de cultivo), a derrames cercanos a ríos y a derrames ocurridos a cierta distancia, con similar intensidad y condiciones.

Alternativamente, es posible generar un modelo de vulnerabilidad, que incluya las diferentes variables incluidas en la propuesta. Dependiendo de las características de cada geosistema los valores de las variables pueden cambiar dando lugar a la generación de diversos escenarios.

A partir de estos ejercicios, es posible la construcción de un modelo matemático de dispersión del contaminante. La modelación de la dispersión es una simulación matemática de cómo los contaminantes se dispersan en un ambiente determinado (marino, terrestre, atmosférico). El modelo se realiza a través de programas de cómputo que resuelven ecuaciones matemáticas o algoritmos que simulan el proceso de dispersión.

Los modelos de dispersión requieren de la introducción de un conjunto de datos, como los siguientes: condiciones del terreno, tales como las características del suelo (porosidad, permeabilidad, etc); características físicas y químicas del hidrocarburo (densidad, viscosidad, etc); y datos de elevación del terreno en la ubicación geográfica de la fuente y del sumidero. Para ello, sería muy conveniente contar con estos datos de un caso real para proceder a una comparación y evaluar la capacidad predictiva del modelo. La selección y evaluación del modelo son actividades que quedan sujetas a la disponibilidad de la información necesaria y de la calidad requerida.

10. Discusión

10.1. Análisis de resultados obtenidos

Considerando la vulnerabilidad general del área de estudio seleccionada es importante señalar que se trata de un área sensible, por las siguientes razones:

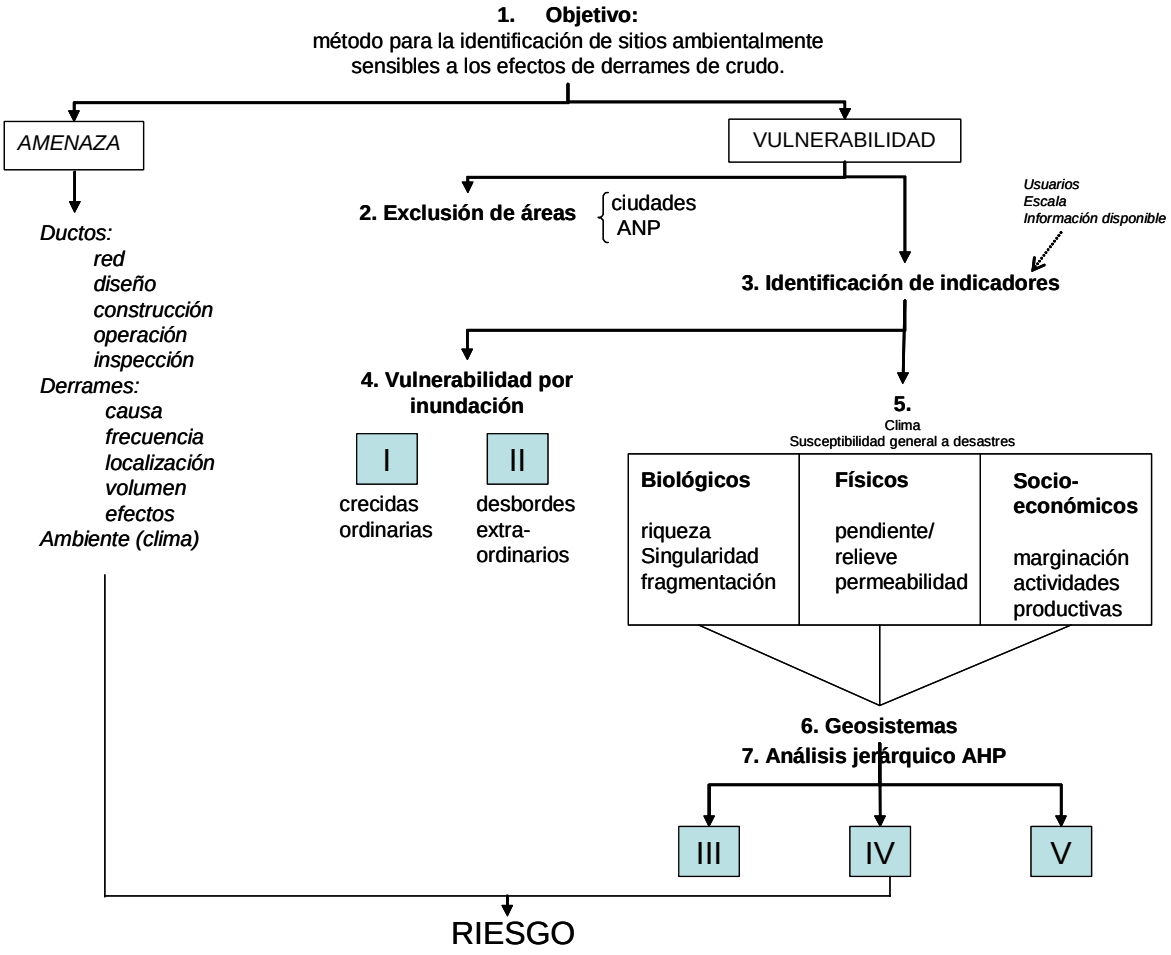

Figura 12. Síntesis de la metodología propuesta.

El clima es cálido-húmedo de los tipos Am, caracterizado por altos niveles de precipitación media anual (2,300 y 2,800 mm), lo que aumenta su potencialidad de que en caso de derrame éste sea sujeto de rápida y amplia dispersión, sobre todo de junio a noviembre cuando se concentran las lluvias.

En cuanto a la susceptibilidad a desastres naturales y antropogénicos, es un área sensible a los mismos, conforme a lo señalado en el Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec (2003). Es particularmente sensible a inundaciones y subsidencia generalizada, lo que, aunado al clima y a la ocurrencia de huracanes y Nortes, contribuye a definir que el problema de la dispersión del derrame por agua es

crucial en esta zona. La degradación de tierras provocada por las actividades socioeconómicas igualmente favorece dicha dispersión.

Con base en esto, los 5 niveles de vulnerabilidad establecidos en el presente estudio deberán tomarse con cautela, ya que incluso el nivel más bajo está marcado por una vulnerabilidad de base, que a escala nacional pudiera representar una vulnerabilidad alta.

La aproximación metodológica empleada tiene puntos a favor y en contra; una característica que debe resaltarse es su flexibilidad para adaptarse a diversas circunstancias, lo que podrá interpretarse como ventaja o desventaja; en este análisis la consideramos una ventaja por las siguientes razones:
En el contexto de la zona de estudio, se estableció que el punto medular en la zona era la dispersión por agua del derrame, como se dijo anteriormente, además de las comunicaciones personales que se tuvieron con autoridades municipales con experiencia en la atención de este tipo de eventos. El asumir esta condición, podría resultar cuestionable, si se argumenta que las dificultades técnicas para sanear el suelo son más complicadas que en agua y que los efectos también son más perdurables en suelos que en agua.

La ventaja de la metodología aplicada es que se analizaron ambos sistemas por separado: categorías I y II de vulnerabilidad para agua y categorías III, IV y V para suelos; de manera que podrían interpretarse no como una jerarquía estricta sino como dos sistemas complementarios, por ejemplo la vulnerabilidad III podría también interpretarse como vulnerabilidad I para suelos.

Otra característica importante es la asignación de pesos para ponderar cualquiera de los tres medios que se analizaron. El ejercicio se practicó con una propuesta acordada con el INE, que privilegió los medios físico y biológico sobre el medio socioeconómico (pesos de 40, 40 y 20%, respectivamente), pero estos pesos pueden modificarse dependiendo del énfasis que se quiera dar a cada uno de los

componentes.

Se pudieron también hacer ciertos aportes importantes con respecto a otras aplicaciones reportadas en la metodología AHP. Un aspecto destacado fue que se logró complementar satisfactoriamente con otro método independiente (centrado en la geomorfología fluvial), ya que las características particulares de la zona de estudio con respecto a las altas cantidades de agua y terrenos inundados así lo requerían. No bastaba con tratar de explicar la vulnerabilidad únicamente con base en variables propias de terrenos normalmente secos, por ejemplo: pendiente, relieve y permeabilidad; por lo que hubo que incorporar variables que definieran la dinámica fluvial en la zona de estudio: los rasgos geomorfológicos identificables impresos en la superficie del terreno a causa de los flujos normales de agua propios de la zona y los caudales en eventos extraordinarios.

Otro punto novedoso fue la incorporación de la información socioeconómica con que se contaba para obtener una descripción integral de los geosistemas; esto es, hubo que ajustar la información que normalmente se registra y reporta en términos de división política (estado, municipio, localidad) a los límites dictados por condiciones físico-geográficas de la zona de estudio. La propuesta en este sentido consideró la información a nivel localidad que fue reagrupada conforme a los geosistemas identificados y luego ponderada en función, primero, de la cantidad total de habitantes por geosistema y, segundo, por el área total que agrupó cada geosistema, logrando que la información fuera equiparable.

En cuanto a los resultados obtenidos, no sólo se generó el mapa acordado de vulnerabilidad compuesta (incluyendo medios físico, biológico y socioeconómico) sino un mapa de vulnerabilidad específico para cada uno de los medios evaluados, lo que representa una ventaja en cuanto a la posibilidad de armar combinaciones de pesos conforme a enfoques particulares, permitiendo la generación de multitud de escenarios alternativos.

Tabla 8. Superficie abarcada por categoría de vulnerabilidad en la zona de estudio

Nivel de vulnerabilidad	Km^2	Porcentaje
Nivel I	303.88	17.1
Nivel II	321.41	18.1
Nivel III	265.91	15.0
Nivel IV	233.24	13.1
Nivel V	585.26	33.0
Otros*	68.26	3.8
Total del área	1,775,91	100

*Se refiere a los geosistemas tecnógenos-industriales y urbanos o rurales que tienen una expresión areal pero que no se incluyeron en el análisis de la vulnerabilidad.

De lo reflejado en el mapa de vulnerabilidad compuesta, se obtuvieron los siguientes resultados:

El 35.2% del total del área analizada corresponde a los niveles I y II de vulnerabilidad, que a su vez, pueden interpretarse como vulnerabilidad de las áreas inundables y se traduce en áreas en las que si llegara a presentar un derrame (dependiendo de su magnitud y duración) sería rápida y ampliamente dispersado, afectando no sólo a ríos y lagunas que formen parte de su trayectoria sino a los geosistemas asociados, específicamente los humedales (incluyendo manglares), por lo que la atención deberá ser inmediata, dirigida a detener la fuga en su origen lo más pronto posible y tender barreras interceptando el flujo de los hidrocarburos. Los efectos a largo plazo dependerán en gran medida de lo oportuno de esta primera intervención.

Dado que el área contenida dentro del nivel I se define por los caudales normales o promedio para la región, es claro que los daños estimados de un eventual derrame se presentarían casi con seguridad en esta zona, en tanto que en el área de vulnerabilidad II estos daños se presentarían con certeza sólo si se añaden condiciones meteorológicas de extrema precipitación dentro de la zona o en el áreas aledañas.

En términos de geosistemas, el nivel I de vulnerabilidad incorpora la planicie

acumulativa de bajos inundados permanentemente (vegetación hidrófila); en tanto que en la vulnerabilidad II quedan incluidos: el manglar y la planicie acumulativa fluvio-lacustre y palustre (vegetación hidrófila y pastizales inundables).

Los manglares resultaron bajo estos criterios levemente más protegidos a potenciales derrames que otro tipo de humedales. La diferencia se da porque en las zonas con nivel I los hidrocarburos pueden extenderse más, pues los bajos están inundados permanentemente; mientras que en el nivel II la dispersión del derrame estaría condicionada a los hidroperiodos, es decir a los cambios estacionales de humedad en el suelo

Como se mencionó anteriormente, las siguientes tres categorías pueden interpretarse como las vulnerabilidades de terrenos de bajo a nulo potencial de inundación, por lo que los criterios de relieve-pendiente y permeabilidad son mucho más aplicables.

La vulnerabilidad III (o I de suelos) cubre un 15% del área total y agrupa un sólo geosistema: la selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria que, si bien tiene una distribución muy dispersa en la zona, hay fragmentos que se encuentran en estados de recuperación relativamente avanzados que probablemente pudieran incorporarse bajo un solo plan de protección para recuperar en parte este recurso. En cuanto a su vulnerabilidad a derrames, conforme a su localización, este geosistema parece ser especialmente vulnerable debido a la gran cantidad de pozos petroleros e infraestructura asociada que alberga. Lo que hace a esta zona particularmente susceptible a derrames es la irregularidad de su relieve con carencia de accesos rápidos y directos, dificultando o retrasando la atención de una eventual emergencia. Esta irregularidad también dificulta la aplicación de prácticas de atención de forma uniforme, ya que los bajos entre lomeríos pueden actuar como una red de pequeñas trampas de captación, requiriendo atención prácticamente individualizada.

La vulnerabilidad IV (o II de suelos) agrupa tres geosistemas: planicie acumulativa

costera (campos de dunas), playas arenosas y agricultura de temporal con cultivos anuales, cubriendo el 13.1% del área estudiada. En términos de área total es muy similar a la categoría anterior y, dado que incluye diferentes geosistemas, es difícil atribuir la vulnerabilidad que les es propia a una sola característica: Por un lado se manifiesta claramente el efecto físico de la permeabilidad (dunas y playas) que facilitan la penetración de los hidrocarburos, haciéndolos más difíciles de limpiar y demandando sistemas más drásticos para remover los residuos, por lo que podría interpretarse que se esperarían efectos a largo plazo en estos ambientes. Por otro lado, aparece el primer geosistema definido por la actividad humana, la agricultura de temporal, que resulta particularmente sensible por la desprotección de las personas que lo ocupan (alto índice de marginalidad), así como lo susceptible que son éstas o sus pertenencias (terrenos de labor) o su actividad (agricultura).

La vulnerabilidad V, que se refiere al 33% del total del área estudiada, indica los espacios más resistentes a los efectos de un derrame de petróleo crudo. Recordando siempre que se trata de niveles de comparación interna; esto es, son los menos vulnerables dentro de un área de atención prioritaria a nivel nacional. Incluye los siguientes geosistemas: mixtos, pastizales cultivados e inducidos, agricultura de humedad, cultivos semipermanentes y permanentes, y cultivos permanentes. Nuevamente se incluye en esta categoría una gama de posibilidades, aunque podríamos nombrarlo el grupo de agro-ecosistemas, ya que, salvo el geosistema mixto, todos incluyen prácticas agrícolas de diferente índole. Ni las características físicas ni las biológicas son relevantes para su definición y de las socioeconómicas es particularmente importante el hecho de que dependen de la producción de la tierra, lo que fija su vulnerabilidad. En la gráfica de la figura 13 se presenta la síntesis de los resultados obtenidos.

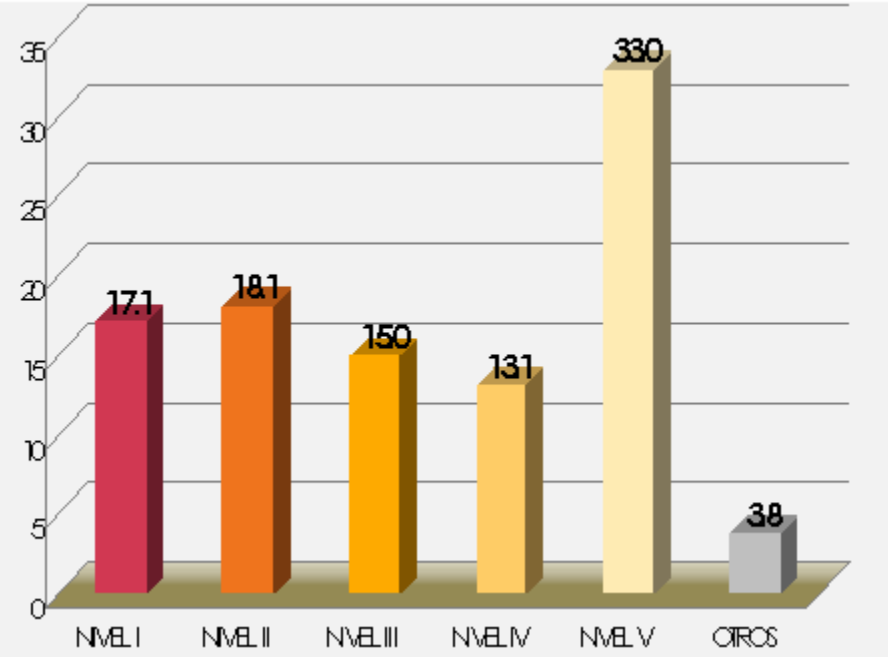

Figura 13. Gráfica de porcentaje de superficie estudiada por categoría de vulnerabilidad

10.2. Análisis de la calidad, acceso y disponibilidad de la información

Durante la realización del presente estudio una de las dificultades más importantes fue la disponibilidad de información. En este aspectos se pueden mencionar las las siguientes limitaciones:

Muy poca de la información obtenida tuvo formato para su representación espacial; esto es, no tenía asociadas coordenadas geográficas que permitieran su ubicación y posterior manejo dentro del ambiente que requiere un SIG. Existen por ejemplo referencias aproximadas como esta: “línea de descarga no identificada de 3¨ de diámetro localizada a 20 metros del pozo Tonalá 139 (F/O)” las cuales no permiten su procesamiento o, en el mejor de los casos, requieren de una gran inversión de tiempo que, dados las condiciones y exigencias contractuales, no fue posible absorber.

La información está dispersa en trabajos, memorias, informes de diferentes tipos y

en diferentes instituciones con diferentes accesos o disponibilidad. Cada vez se va haciendo más indispensable contar con una base de datos centralizada, accesible, actualizada y georeferida, que permita estimar con qué se cuenta para el desarrollo de proyectos como el presente.

La actualización de dicha información es también muy importante ya que en raros casos se puede evaluar la velocidad de ciertos procesos. Específicamente en este trabajo se recurrió a las imágenes de Google-Earth e imagen SPOT 2005 para afinar los límites de los geosistemas, llamando la atención que el cambio del uso del suelo es un proceso casi de día a día, por ello este tipo de información debiera considerarse en las bases de datos que se propongan.

Por otra parte, la base de datos de la CONABIO, que ya posee coordenadas, contiene registros no actualizados (de los años 70) y la distribución de las especies reportadas (muy pocas) no coincide con la información real, por lo que estos datos se manejaron a nivel municipal y no puntual.

En el anexo 7 se incluyen dos tablas que indican la cartografía que se generó para este estudio, la que se requirió, las fuentes de información consultadas, así como algunas de las limitantes que se tuvieron en el manejo de la información disponible.

La calidad y confiabilidad de la cartografía generada queda necesariamente determinada por la calidad de los datos con que se alimentan las tecnologías y métodos empleados y debiera ser un proceso en que se tenga en cuenta una actualización regular y sistemática. De nada sirve generar mapas que representan un punto en el tiempo y no se tenga confianza en que corresponda a la realidad. Para lograr este dinamismo, los SIG son herramientas muy prometedoras y útiles, siempre y cuando se alimenten correctamente. Estos últimos comentarios también aplican a los productos cartográficos generados en este estudio.

10.3. Aspectos generales

Sería interesante continuar este tipo de trabajos y contar con estudios similares en otras áreas prioritarias en cuanto a incidencia de derrames de petróleo crudo se refiere, a saber: Tabasco, Norte de Veracruz-Sur de Tamaulipas y Campeche.

La propuesta metodológica aquí vertida es susceptible de aplicarse a otro tipo de eventos: otros productos diferentes al petróleo crudo, otro tipo de transportes diferentes a los ductos, otro tipo de efectos diferentes a los derrames, etc. Lo que permitirá ir delineando una herramienta más eficiente y completa.

La aplicación de esta metodología a otras regiones, dado que cambian todas las condiciones, necesariamente implicaría un nuevo estudio, ya que las variables que se eligieron en este caso fueron dictadas por la especificidad de la región y muy probablemente no describan regiones con otras características. Es por esto que se visualiza, de continuar trabajando en esta dirección, validar la metodología con casos específicos y una vez probada a nivel de detalle, ampliar con más confianza su utilización en otras regiones. Por otro lado, en esta etapa no se consideró el estado inicial de los geosistemas. Resulta más que probable que la vulnerabilidad de un sistema se vea modificada por la cantidad y calidad de “afectaciones” previas, que van menguando su capacidad de recuperación o de amortiguación. Habiendo resultado en esta etapa que los humedales-manglares son los geosistemas que demandan más atención, dado su alto nivel de vulnerabilidad, sería muy conveniente elaborar un diagnóstico más detallado de estos geosistemas particulares con vías a definir la contribución del “estado inicial” a la vulnerabilidad “actual”.

Habría que recalcar que la utilidad de los productos generados es una cuestión difícil de evaluar en este momento; sin embargo, está sujeta a un gradual enriquecimiento a medida que se incorporen los comentarios y retroalimentaciones de los usuarios de estos productos; situación que se verá facilitada por la difusión

de estos resultados a través de la página del INE.

En resumen, se cumplió satisfactoriamente con los objetivos fijados en este estudio. El punto más débil fue siempre la información necesaria para caracterizar el peligro. Ni los municipios cuentan con la información actualizada y veraz lo que posa una debilidad extrema a cualquier esfuerzo que se dirija a la atención de este tipo de emergencias.

11. Conclusiones

El área estudiada es sensible a desastres debido a su clima, su ubicación y a la gran cantidad de infraestructura industrial que alberga, lo que la hace un centro estratégico a nivel nacional en cuanto a riesgo por desastres de origen natural y humano.

Dentro de esta área de por sí sensible, se identificaron 5 niveles de vulnerabilidad relativa, comparando por pares los geosistemas encontrados.

Se adoptó una metodología que integra dos métodos independientes pero complementarios, a) los patrones de geomorfología fluvial de la zona y b) el proceso de análisis jerárquico.

La adaptación de una metodología compuesta respondió a la preponderancia que tienen los procesos hídricos en la zona de estudio y los reportes de las experiencias sufridas con anterioridad, lo cual permitió jerarquizar en los niveles más altos dos categorías de vulnerabilidad por agua y en los niveles más bajos, 3 categorías de vulnerabilidad en suelo.

En el presente estudio se propone un método complementario mediante ponderación de valores para transformar la información socioeconómica referida por división política a información por geosistema, rindiendo la información más

equivalente.

Como productos se presentan cuatro mapas de vulnerabilidad:

1. Escenario integral, considerando 40% del medio físico, 40% del medio biológico y 20% del medio socio-económico.
2. Escenario del medio físico (50% pendiente-relieve, 50% permeabilidad)
3. Escenario del medio biológico (33% riqueza, 33% singularidad y 33% fragmentación)
4. Escenario del medio socio-económico (50% índice de marginación, 50% índice de actividad productiva)

Conforme al mapa integral, 35.2% del área total es altamente vulnerable (debido principalmente al agua) y 61.1% presenta vulnerabilidades medias a bajas (vulnerabilidad edáfica principalmente). Estos resultados deben interpretarse como niveles al interior de una zona de por sí vulnerable.

En cuanto a geosistemas, los que resultaron más vulnerables fueron los humedales (incluyendo manglares) y las selvas altas y medianas perennifolias con vegetación secundaria en segundo término.
La calidad, acceso y disponibilidad de la información para la realización de este trabajo fueron inadecuadas o insuficientes, especialmente inhabilitaron la incorporación del factor del peligro.

Sería recomendable validar la metodología propuesta en sitios específicos con el fin de tener idea del riesgo que pudiera representar un derrame para la conservación de los humedales de la zona.

La utilidad de los productos generados queda en función de la actualización periódica de la información que los conforma, así como del enriquecimiento que aporten las sugerencias de los usuarios de los mismos.

12. Referencias biliográficas

Adler E. and M. Inbar. Shoreline sensitivity to oil spills, the Mediterranean coast of Israel: Assessment and analysis. Ocean & Coastal Management. Vol 50, Issues 1-2, 2007. pages 24-34

AlMaleck S.A., A.M.O. Mohamed. Environmental impact assessment of off shore oil spill on desalination plant. Desalination 185 (2005) 9-30

Almasri M.N. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. Journal of Environmental Management (2007), doi:10.1016/j.jenvman.2007.01.022

Anselin, A. and P.M. Meire. (1989). Multicriteria Techniques in Ecological Evaluation: an Example Using the Analytical Hierarchy Process. Biological Conservation. 49: 215-229.

Aras H., S. Erdogmus, and E. Koc. Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. Renewable Enery: An International Journal. 29(8) (2004) 1383-1393.

Banai-Kashani, R. (1989). A new method for site suitability analysis: The Analytic Hierarchy Process. Environmental Management, 13(6): 685-693.

Basnet B.B., A. A. Apan, S. R. Raine. Selecting suitable sites for animal waste application using a raster GIS. Environmental Management. 28(4) (2001) 519–531.

Bassols, A. (1982). Geografía, subdesarrollo y regionalización. Ed. Nuestro Tiempo. México. D.F. 250 p.

Bataillon, C. (1969). Las regiones geográficas de México. Ed. Siglo XXI. México. 234 p.

Bojórquez-Tapia L.A., H. de la Cueva, S. Díaz, D. Melgarejo, G. Alcanzar, M.J. Solares, G. Grobet and G. Cruz-Bello. Environmental Conflicts and Nature Reserves: Redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, Mexico. Biological Conservation. 2004 (117) 111-126.

Bojórquez-Tapia L.A., L. Juárez, G. Cruz-Bello. (2002) Integrating fuzzy logic, optimization, and GIS for ecological impact assessments. Environmental Management. 30(3) 418 – 433.

Bojórquez-Tapia L.A., L.P. Broker, G. Castilleja, S. Sánches-Colón, H. Hernández, W. Calvert, S. Días, P. Gómez-Priego, G. Alcanzar. E.D. Melgarejo, M.J. Solares, I. Gutiérrez and M.L. Juárez. Mapping Expert Knowledge: Redesigning the Monarc Butterfly Biosphere Reserve. Conservation Biology. 2003. Vol 17-2, 367-379.

Bojórquez-Tapia L.A., S. Díaz-Mondragón and E. Ezcurra. GIS-based approach for participatory decision making and land suitability assessment. Int. J. Geographical Information Science. 2001, Vol 15(2) 129-151.

Bowen M.M., T. Kontuly, and G.F. Hepner, Estimating maquiladora hazardous waste generation on the U.S./Mexico border. Environmental Management. 19(2) (1995) 281-296.

Cardona O. M. (1993).”Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo”. En: Maskrey Andrew.(Compilador) (1993). Los desastres no son naturales. LA RED, Red de

Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Tercer Mundo Editores. Colombia. Pp. 51-74.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de Peligros y Riesgos (fenómenos químicos). CENAPRED, 2006. 184 pp.

Collins, M.G., F.R. Steiner and M.J. Rushman. (2001). Land-use Suitability Analysis in the United States: Historical Development and Promising Technological Achievements. Environmental Management, 28: 611-621. .

Cram, S., I. Sommer, L.M. Morales, O. Oropeza, E. Carmona and F. González-Medrano. (2006). Suitability of the vegetation types in Mexico's Tamaulipas state for the siting of hazardous waste treatment plants. Journal of Environmental Management, 80(1): 13-24.

Cram, S., Siebe, C., Ortíz, R. and Herre, A. 2004. Mobility and persistence of petroleum hydrocarbons in tropical peat soils in southeastern Mexico. Soil and Sediment Contamination. 13 (5) 341-360.

Cuanalo, C., T. Ojeda, O. Santos y C. Ortiz-Solorio. (1980). Provincias y regiones terrestres de México. SARH-Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. III tomos. 480 p.

Chien-Chung H. and M. Hwong-Wen. A multidimensional environmental evaluation of packaging materials. Science of the Total Environment. 324 (1-3) (2004) 161-173.

Dey P.K. An integrated assessment model for cross-country pipelines. Environmental Impact Assessment Review. 22(6) (2002) 703-721.

Duke J.M., and R. Aull-Hyde. Identifying public preferences for land preservation using the analytic hierarchy process. Ecological Economics. 42(1/2) (2002) 131-146.

EPA (1999). Undestanding oillspills and oilspillresponse. www.epa.gov/oilspills/pdfs. (fecha de consulta septiembre 2007).

EPA, 2007 (www.epa.gov/oilspill/relation.htm - octubre 2007).

Gamini H. Incorporating community objectives in improved wetland management: the use of the analytic hierarchy process. Journal of Environmental Management. 70(3) (2004) 263-274.

García A., Oropeza O. y Galicia L. (2005). “Land-use systems and resilience of tropical rainforest in the Tehuantepec Isthmus, México”. En Environmental Management. Spring-Verlag New York, LLC. SIN: 0364-152X (paper), 1432-1009 (Online).Vol 34, No. 6, USA. Pp. 768-785.

García E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Base de datos climatológicos 1921-1995. Programa para la clasificación del clima. Versión Digital. Instituto de Geografía, UNAM. México.

Gobierno del Estado de Veracruz (2002). Área Natural Protegida: La Alameda. Programa de Manejo. Vol. 5. Serie: Protejamos Nuestro Medio Ambiente. Veracruz, México. 99p.

Gobierno del Estado de Veracruz. Atlas Estatal de Riesgos. Veracruz de Ignacio de la Llave. Secretaría de Seguridad Pública. Subsecretaría de Protección Civil. http://www.proteccioncivilver.gob.mx/casode/atlas.htm

Gobierno del Estado de Veracruz-Llave (2005). Actualización del Programa de

Ordenamiento Urbano de la Zona Conurbada Coatzacoalcos-Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río-Ixhuatlán del Sureste. Xalapa, Ver. 531 p.

González, O. (1994). Enfoque Geosistémico en la Investigación Geográfica del Medio Ambiente Cubano. En: Geografía del Medio Ambiente. Una Alternativa del Ordenamiento Ecológico. Colección: Ciencias y Técnicas/24. Universidad Autónoma del Estado de México. México. pp. 33-50.

Gutiérrez J. A. Diseño de un Modelo de Análisis de Sensibilidad Ambiental bajo Sistemas de Información Geográfica (SIG). Resumen del Proyecto de tesis Universidad de Los Andes - Facultad de Ingenieria. Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas. Perú. 7p. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jgutie/investigacion/JGutierrezExtenso.htm

Hernández R. Víctor (2006). Identificación de zonas de riesgo y peligros naturales en el ducto de gas natural GN-D084. Tesis de Maestría en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.

Hernández-Santana J. R., A. P. Méndez Linares y M. Figueroa Mah–Eng (2006). Desarrollo geomorfológico de los ecosistemas costeros de manglares y dunas del estado de Veracruz: morfoestructura y morfogénesis. Informe geomorfológico final del Proyecto: Sistema costero del estado de Veracruz: fisiografía, geomorfología, riesgos y ecología de manglares y dunas costeras, implicaciones para su manejo. (SEMARNAT-2002-CO1-0126).

Hokey M. Location planning of airport facilities using an analytic hierarchy process. Logistics and Transportation Review. 30(1) (1994) 79-95.

Instituto Nacional de Ecología - Instituto Mexicano del Petróleo (INE-IMP) (1997). Proyecto de ordenamiento ecológico de la cuenca baja del río Coatzacoalcos. (Informe Técnico). México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2001). XII Censo General de la Población y Vivienda, 2000. Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1987). Síntesis Geográfica del Estado de Veracruz. Aguascalientes, México.

International Maritime Organization/International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IMO/IPIECA). Report Series Vol. 1. Sensitivity Mapping for Oil Spill Response. 1994. 24 pp.

Iturbe R., C. Flores, A. Castro, L.G. Torres. Sub-soil contamination due to oil spills in six oil-pipeline pumping stations in northern Mexico. Chemosphere (200/, doi:10.1016/j.chemosphere.2007.02.004

Kazakidis V.N., Z. Mayer and M.J. Scoble. Decision making using the analytic hierarchy process in mining engineering. Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining & Metallurgy. Section A . 113(1) (2004) 30-43.

Kovacs J.M., J. Malczewski and F. Flores-Verdugo. Examining local ecological knowledge of hurricane impacts in a mangrove forest using an analytical hierarchy process (AHP) approach. Journal of Coastal Research. 20(3) (2004) 792-8001.

Kumar Dey, P., (2002). An integrated assessment model for cross-country pipelines. Environmental Impact Assessment Review. 22:703-721.

Lahdelma R., P. Salminen and J. Hokkanen. Using multicriteria methods in environmental planning and management. Environmental Management. 26(6) (2000) 595–605.

Lewan, M. D.: 1984, 'Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel in crude oils', Geochimica et Cosmochimica Acta 48(11), 2231–2238.

Li A., A. Wang, S. Liang, W. Zhou. (2006) Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS-A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. Ecological Modeling 192 , 175-187.

Li C.P. and I. K. Hui. (2001) Environmental impact evaluation model for industrial processes. Environmental Management. 27(5) , 729 – 737.

Malczewski J., R. Moreno-Sánchez, L.A. Bojórquez-Tapia and L. Ongay Delhumeau. (1997). Multicriteria Group Decisión-making Model for Environmental Conflict Análisis. Journal of Environmental Planning and Management, 40(3): 349 374.

Mardle S., S. Pascoe and I. Herrero. Management objective importance in fisheries: an evaluation using the analytic hierarchy process (AHP). Environmental Management. 33(1) (2004) 1–11.

Martínez, N. (2000). Desarrollo de la industria petroquímica en el Sureste de Veracruz. Impactos territoriales durante el periodo 1970-1977. Facultad de Filosofía y Letras. División de Estudios de posgrado. Tesis de Doctorado. UNAM, México.

Marull J., J. Pino, J.M. Mallarach, M.J. Cordobilla. A land suitability index for strategic environmental assessment in metropolitan areas. Landscape and urban planning (2006), doi:10.1016/j.landurbplan.2006.11.005

Mayerik, A. 1970. "Photointerpretation in hydrology, a geomorphological approach", en I.T.C. Textbook of photointerpretation. Cap. 3 Vol. VII Use of aerial photographs in geomorphology. Delft, Holanda.

Melloul A.j., S.H. Wollman. Qualitative hydrological and land-use planning tool for the Israel coastal aquifer. The Science of the Total Environment. 309 (2003) 1-17

Méndez, R. y Caravaca, I. (1996). Organización industrial y territorio. Editorial Síntesis. España. 365 p.

Mendoza G.A. and R. Prabhu. Development of a methodology for selecting criteria and indicators of sustainable forest management: a case study on participatory assessment. Environmental Management. 26(6) (2000) 659–673.

Metzger M. J., M.D.A. Roinsevell, L. Acosta-Michlik, R. Leemans, D. Schröter. The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agriculture, Ecosystems and Environment 114 (2006) 69-85.

Metzger M.J., R. Leemans, D. Schröter. A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7 (2005) 253-267.

Morales-Caselles C., J. Kalman, I. Riba, T.A. del Valls. Comparing sediment quality in Spanish littoral areas affected by acute (Prestige, 2002) and chronic (Bay of Algeciras) oil spills. Environmental Pollution 146 (2007) 233-240.

Murck W. Barbara, Skinner j. Brian & Porter C. Stephen. (1997). Dangerous Earth. An Introduction to Geologic Hazards. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2002) Technical Memorandum NOS OR&R 11. Environmental Sensitivity Index Guidelines, Version 3.0. http//archive.orr.noaa.gov/esi/guidelines/guidelines.htlm

NOM-SENER-2006. PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-XX-SENER-2006. Administración de la Integridad de Ductos de Recolección y Transporte de Hidrocarburos. DOF- 2006

Olivera-Villaseñor R. E. (2006). Los factores de riesgo y la vulnerabilidad física en los derechos de vía del sistema de poliductos, estado de Tabasco. Tesis de Doctor en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.

Olivera-Villaseñor R. E. y A. Rodríguez-Castellanos (2005). "Estudio del riesgo en ductos de transporte de gasolinas y diesel en México". En: Científica. Vol. 9. Núm. 4. ESIME-IPN. México. Pp 159-165.

Oropeza, O., L.M. Mitre, F. Nava, K.J. Meyer, J.R. Serrano y A.O. Alba (1999). Impacto ambiental y peligros naturales y antropogénicos en la Península de Yucatán. Capítulo III-7. En: Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Texto y mapas. Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Yucatán. pp. 247 – 266.

Ortiz-Solorio, C.A. y C. Cuanalo (1978). Metodología del Levantamiento Fisiográfico: Un Sistema de Planificación de Tierras. Colegio de Posgraduados. Chapingo. México. 109 p.

Pavlikakis G.E. and V.A. Tsihrintzis. A quantitative method for accounting human opinion, preferences and perceptions in ecosystem management. Journal of Environmental Management. 68(2) (2003) 193-207.

Petróleos Mexicanos (2006). Anuario Estadístico. México.

Pineda-Henson R., A. B. Culaba, and G. A. Mendoza. Evaluating environmental performance of pulp and paper manufacturing using the analytic hierarchy process and life-cycle assessment. Journal of Industrial Ecology. 6(1) (2002) 15-29.

Purnendu B. and Ch. Ritwik. (2003) Application of optimized multi-criteria decision-making in an environmental impact assessment study. Civil Engineering & Environmental Systems. 20(1) 31-49.

Quiñones, G. (1980). El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía. SPP, INEGI, Dirección General de Geografía. México, D.F. 21 p.

Rzedowski J., Vegetación de México. Limusa, México, 1978, 432 pp.

Saaty T.L., The Analytical Hierarchy Process. McGraw-Hill, N.Y. USA, 1980, 287 pp.

Saaty, R.W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. Mathematical Modelling. 9(3-5):161-176.

Sadiq R., T. Husain, B. Veitch and N. Bose. Evaluation of generic types of drilling fluid using a risk-based analytic hierarchy process. Environmental Management. 32(6) (2003) 778 – 787.

SAHOP (1981). Programa Nacional de Desarrollo Ecológico de los Asentamientos Humanos. Dirección General de Desarrollo Ecológico de Asentamientos Humanos. México, D. F. 217p.

Sánchez, M.T. y O. Oropeza (Coord.) (2003). Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec. Proyecto DGAPA-PAPPIT: Industria petrolera y cambios

territoriales en el marco de la globalización económica: El caso del Istmo de Tehuantepec. (IN306598). Instituto de Geografía-UNAM. México. Versión Digital.

Secretaría de Marina-Armada de México, (SEMAR) (1991). Actividades que realiza la Secretaría de Marina-Armada de México en materia de prevención y control de la contaminación del medio marino. Coordinación General de Servicios Técnicos. Dirección General de Ecología Marina. Archivo Interno. México.

SEDUE (1986). Informe sobre el estado del medio ambiente en México. Subsecretaría de Ecología. Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica. México D.F. 83 p.

Seip K.L., E. Sandersen, F. Mehlum, J. Ryssdal. Damages to seabirds from oil spills: comparing simulation results and vulnerability indexes. Ecological Modeling, 53 (1991) 39-59.

Siddiqui M.Z., J.W. Everett and B.E. Vieux. Landfill siting using geographic information systems: a demonstration. Journal of Environmental Engineering. 122(6) (1996) 515-524.

Smith-Korfmacher K. The politics of participation in watershed modeling. Environmental Mangement. 27(2) (2001) 161 – 176.

Sólones J. Environmental quality indexing of large development alternatives using AHP. Environmental Impact Assessment Review. 23(3) (2003) 283-303.

Spires, E. E.. Using the analytic hierarchy process to analyze multiattribute decisions. Multivariate Behavioral Research. 26(2) (1991) 345-362.

Toledo, A. (1982). Petróleo y ecodesarrollo en el sureste de México. Centro de Ecodesarrollo.

Toledo, A. (1988). Energía, ambiente y desarrollo. Serie Medio ambiente en Coatzacoalcos. Vol. XV. Centro de Ecodesarrollo. México.

Tran L.T., C. G. Knight, R. V. O'Neill, E. R. Smith, K. H. Ritters, and J. Wickham. Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the Mid-Atlantic region. Environmental Management. 29 (6) (2002) 845 – 859.

Tricart, J. (1978). Géomorphologie Aplicable. Masson. Paris. 204 p.

Tricart, J. et J. Killian (1979). L´Eco-géographie et l´aménagement du milieu naturel. FM/Herodote. Paris, France. 326 p.

Tseng Ch, Sh. Chen, Ch. Huang and Ch. Liu. GIS-assisted site selection for artificial reefs. Fisheries Science. 67(6) (2001) 1015-1023.

Wei Y.M., Y. Fan, C. Lu, H-T. Tsai. The assessment of vulnerability to natural disasters in china by using the DEA method. Environmental Impact Assessment Review. 24(2004) 427-439.

Wilches-Chaux G. (1993). “La vulnerabilidad Global” En: Maskrey Andrew.(Compilador). Los desastres no son naturales. LA RED, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Tercer Mundo Editores. Colombia. Pp. 9-50.

World Bank. Guidelines For Monitoring and Evaluation For Biodiversity Projects. Cap. 3 Identifying and Selecting Indicators. 1992, pp 10-14. http://siteresources.worldbank.org/INTBIODIVERSITY/214584.1110959186651/20611829/270310Guidlines0for0monitoring.pdf (fecha de

consulta: mayo 2007).
Worrall F., T. Besien, D.W. Kolpin, Groundwater vulnerability: interactions of chemicals and site properties. The Science of the Total Environment 299 (2002). 131-143.
Yedla S. and R.M. Shrestha. Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi. Transportation Research: Part A.. 37 (8) (2003) 717-730.
Zárate, L. D., A. Yánez-Arancibia, E. Rivera-Arriaga, P. Sánchez, M. A. Ortiz, A. Lara, L. Hernández, H. Alafita y S. Guevara (2001). Diagnóstico ambiental y necesidades para el manejo integral de la zona costera del Golfo de México y Caribe. Informe Técnico. I Panel de Necesidades para la Gestión y el Manejo Integrado de la Zona Costera del Golfo de México y Caribe. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.
Zhu X. and A. P. Dale. Identifying opportunities for decision support systems in support of regional resource use planning: an approach through soft systems methodology. Environmental Management. 26 (4) (2000) 371-384.

13. Referencias cartográficas

CETENAP/ IGEOF, 1970. Carta de climas 1:500 000. Hoja Coatzacoalcos 15Q/ V. Hoja Minatitlán 15Q /VII.
García E. (1992). Climas. Clave IV.4.10. Sección naturaleza Escala 1:4,000,000. En: Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, UNAM, México.
García E., R. Vidal y M. E. Hernández (1992). Regiones climáticas de México. Clave IV.4.10. Sección naturaleza Escala 1:12,000,000. En: Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, UNAM, México.
INEGI, 1982. Carta de Geológia 1:250 000. Hoja Coatzacoalcos E15-4, Hoja Minatitlán E15-7. Instituto Nacional de Geografía e Informática, México.
INEGI, 1984Carta de edafología 1:250 000. Hoja Coatzacoalcos E15-1-4. Hoja Minatitlán E15-4-7. Instituto Nacional de Geografía e Informática, México.
INEGI 2000, Carta topográfica, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Geografía e Informática, México.
MDT, IGg 2007: Modelo Digital de Terreno, a partir de la interpolación de curvas de nivel escala 1:50,000 (INEGI).
Oropeza, O. y C. Enríquez (2003). “Vulnerabilidad Global de los Geosistemas”. Clave VI.6, escala 1:1,000,000. En Sánchez M. T. y Oropeza O. (Coordinadoras). Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec. Instituto de Geografía, UNAM. México. Versión Digital.
Oropeza, O. y C. Enríquez (2003a). “Geosistemas”. Clave III.20, escala 1:1,000,000. En Sánchez M. T. y Oropeza O. (Coordinadoras). Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec. Instituto de Geografía, UNAM. México. Versión Digital.
Oropeza, O. y C. Enríquez (2003b). “Principales Problemas Ambientales y Riesgos”. Clave VI.7, escala 1:1,000,000. En Sánchez M. T. y Oropeza O. (Coordinadoras). Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec. Instituto de

Geografía, UNAM. México. Versión Digital.
Oropeza, O., A. G. Palacio y A. D'Luna (1992). Síntesis del Medio Ambiente. Hoja V.5.1. Mapa a escala 1:4,000,000. En: Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, UNAM. México.
Ortiz P., M. A. (2007) "Diferenciación Geomorfológica de las costas de México." En: Nuevo Atlas Nacional de México. 4 mapas en escalas atípicas. Instituto de Geografía
Sánchez M. T., Martínez L. N. y Martínez G. M. (2003) "Minería: Yacimientos y empresas". Clave V. 17, escala 1:1,000 000. En Sánchez M. T. y Oropeza O. (Coordinadoras). Atlas Regional del Istmo de Tehuantepec. Instituto de Geografía, UNAM. México. Versión Digital.
Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) (1984). Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. Carta Edafológica, escala 1:250,000, Hoja Coatzacoalcos E 15-1-4. México.