

01060



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO  
PARA LA JERARQUIZACIÓN DE SITIOS CON SUELOS  
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA  
(GEOGRAFÍA AMBIENTAL)

**P R E S E N T A**

**SERGIO FRANCISCO MÉNDEZ VELARDE**



DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. LUIS MIGUEL MORALES MANILLA  
CO-DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. JOSÉ JESÚS OCHOA VALDÉS

FAB. DE FILOSOFÍA Y LETRAS

MÉXICO, D. F.



DIVISION DE  
ESTUDIOS DE POSGRADO

SEPTIEMBRE. 2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Dedicatorias

### *A Dulce Ma. G. Martagón de Méndez*

*A mi pareja, amiga y esposa, por su invaluable apoyo en todos esos momentos de flaqueza, en los que sentía que tal vez no lo iba a lograr, sin embargo ahí estaba siempre e incondicional, aportando fuerza moral y dándome ánimos para seguir adelante.*

### *A Laura Velardo Pinos*

*Por haber orientado mi educación por el sendero de la honradez, la honestidad y la responsabilidad, valores que fueron pilares durante el desarrollo y conclusión de este trabajo, y por ese amor que siempre ha tenido para con todos sus hijos.*

### *Juan, Felipe y Norma*

*A mis hermanos, por su apoyo moral durante todo el tiempo que invertí en el presente trabajo, quienes además siempre tuvieron una palabra de aliento y estímulo para que lograra la meta de concluir este trabajo.*

### *Felipe Méndez Lomeli*

*A la memoria de mi padre, quien en su corta convivencia con nosotros, supo educarnos y dejarnos en las manos de quien nos guiara por el camino del bien.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos mis maestros del posgrado, quienes dejaron en mi parte de ellos, logrando en mi formación un crecimiento invaluable en cuanto a conocimientos y experiencias, que serán sin duda muy importantes en el desempeño de mis trabajos a futuro.

Deseo agradecer, al M. en C Luis Miguel Morales Manilla, quien me dirigió y condujo para llevar a cabo y concluir de la mejor manera la presente investigación, además por su trato humano y su disposición en todo momento.

Por otro lado, agradezco de manera especial al M. en C. J. Jesús Ochoa Valdés, por participar en forma activa en la asesoría y dirección para la realización y conclusión del presente estudio, por sus atinados comentarios y sugerencias.

A mis compañeros de maestría; Andres Tautiva, Juan Carlos Gómez, Alicia Rios, Ana Elia Hernández, Citlali Jiménez, Eliot Ramírez, Victor H. Bastida, Gabriela Miranda, Laura Garcia, Gustavo Hernández y Adrián Rojo, así como a mis colegas del Instituto Mexicano del Petróleo; Marco A. Tenorio, Andres Rosas, David Flores, Karina Lobera, Karina Shomar, Sergio Vázquez, Jacqueline Salazar, Alejandro Montes de Oca, Horalía Bolaños, Jorge Canto, Nicolás Rauda y Marco A. Vilchis, les agradezco su apoyo y participación en las sesiones de encuestas de "Opinión de Expertos" (selección de criterios) y durante la etapa de comparaciones binarias parte de la técnica (AHP) en cuanto a la evaluación de los criterios para la elaboración del procedimiento de jerarquización.

Deseo agradecer de forma especial a la Dra. Irasema Alcántara A., por haberme dado la oportunidad de ocupar parte del tiempo de la clase de seminario de tesis, la cual ella imparte, para llevar a cabo las sesiones de "Opinión de Expertos".

Expreso mi entero agradecimiento a la Dra. Lilia Susana Padilla y Sotelo, Dr. José Gasca Zamora y al Dr. Enrique Propín Frejomil, por su participación como sinodales, en la revisión del manuscrito y por sus valiosas sugerencias.

Agradezco a las autoridades del Instituto de Geografía, por haberme permitido hacer uso de las instalaciones para realizar parte de mis estudios y de esta investigación.

Quisiera agradecer de igual manera a mis superiores, quienes me apoyaron para el otorgamiento del permiso institucional, y así poder realizar mis estudios de grado, en especial al Ing. Carlos Fco. Valdés Olmedo y al Dr. Isaac Schifter Secora, así como a cada uno de los que intervinieron en este proceso.

También deseo hacer patente mi agradecimiento, a los Ingenieros José Manuel Olivares Páez, Gerente de Protección Ambiental y Salud Ocupacional y Pedro Mejía García Sugerente de esa misma dependencia (PEMEX Refinación), por su valioso apoyo, que consistió en facilitar información relacionada con pasivos ambientales y sus acertadas opiniones en relación a este tema.

Por último, reconozco y agradezco el apoyo brindado por la institución en la cual he laborado por más de 20 años (IMP), quien a través del Programa de Formación y Desarrollo del Factor Humano, Subprograma de Estudios de Posgrado en el País a Tiempo Completo, me ha brindado la oportunidad de alcanzar una más de mis metas.

## ÍNDICE

Relación de cuadros, figuras y gráficos .....	1
Resumen.....	5
I. Introducción. ....	9
I.1. La industria petrolera en México.....	10
I.2. El problema de la contaminación del suelo por fugas y derrames de hidrocarburos en México. ....	11
I.3. Experiencias similares y antecedentes de estudios de análisis multi-criterio y jerarquización. ....	22
I.4. Objetivos. ....	23
II. Metodología del estudio.....	25
II.1. Recopilación, análisis y ubicación de la información de sitios contaminados. ....	27
II.1.1. Recopilación y validación de la información de sitios contaminados. ...	27
II.1.2. Análisis y ubicación de sitios contaminados .....	29
II.2. Desarrollo de la metodología para la jerarquización de sitios contaminados. ....	33
II.2.1. Procedimiento para la identificación y selección de los criterios de decisión (Sociales y ambientales).....	33
II.2.2. Aplicación y evaluación del procedimiento jerárquico.....	44
III. Análisis de resultados .....	73
III.1. Método de ponderación de la información.....	73
III.2. Documentación del procedimiento desarrollado.....	83
IV. Conclusiones y beneficios .....	87

IV.1. Conclusiones .....	87
IV.2. Beneficios .....	89
Bibliografía.....	91
Anexo 1.....	100

## **Relación de cuadros, figuras y gráficos**

### **a). Cuadros**

#### **Cuadro I.1.**

Número de fugas y derrames reportados, para los sectores público y privado.  
.....**Pág. 14**

#### **Cuadro I.2.**

Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en 1999 por PEMEX.....**Pág. 15**

#### **Cuadro I.3.**

Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en el 2000 por PEMEX.....**Pág. 16**

#### **Cuadro I.4.**

Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en el 2001 por PEMEX.  
.....**Pág. 17**

#### **Cuadro I.5.**

Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en el 2002 por PEMEX.  
.....**Pág. 18**

#### **Cuadro II.1.1.**

Información general de los 30 sitios seleccionados para llevar a cabo el análisis de Jerarquización.....**Pág. 31**

#### **Cuadro II.2.1.**

Criterios seleccionados y resultados obtenidos de la aplicación de la encuesta "Opinión de Expertos".....**Pág. 36**

#### **Cuadro II.2.2.**

Criterios seleccionados, subdivisiones (subcriterios) y valores nominales  
.....**Pág. 54**

#### **Cuadro II.2.3.**

Relación de cartas temáticas utilizadas como complemento a la información de los sitios seleccionados.....**Pág. 56**



**Cuadro II.2.4.**  
Representaciones numéricas de los juicios verbales.....Pág. 63

**Cuadro II.2.5.**  
Resultados del análisis de jerarquización y priorización de sitios con suelos contaminados con hidrocarburos.....Pág. 68

**Cuadro III.1.1.**  
Resultados de priorización de las 6 combinaciones propuestas para determinar la funcionalidad del modelo de jerarquización.....Pág. 78

**Cuadro III.1.2.**  
Resultados obtenidos al aplicar las correlaciones de Pearson (r).....Pág. 80

**Cuadro III.1.3.**  
Resultados obtenidos al aplicar los porcentajes de similitud (Sumatoria de los porcentajes más bajos).....Pág. 82

## **b). Figuras y gráficos**

**Figura II.1.1.**  
Ubicación de los 30 sitios seleccionados, considerados en el modelo de jerarquización.....Pág. 32

**Figura II.2.1.**  
Arreglo en jerarquía: Meta y Criterios de decisión.....Pág. 59

**Figura II.2.2.**  
Matriz de decisión con sus Alternativas y Criterios.....Pág. 60

**Figura II.2.3.**  
Matriz de decisión con los totales (suma de los pesos de los criterios y subcriterios), marcando las prioridades de las alternativas.....Pág. 61

**Figura II.2.4.**  
Comparación pareada (Pairwise) para la obtención de la importancia relativa de cada criterio de evaluación.....Pág. 62

**Figura II.2.5.**  
Criterios de evaluación seleccionados con sus valores de importancia relativa..... **Pág. 64**

**Figura II.2.6.**  
Matriz de datos o de decisión con los resultados de priorización de sitios contaminados..... **Pág. 65**

**Figura II.2.7.**  
Matriz de datos con los resultados de una priorización con tres sitios hipotéticos, con valores extremos dados a cada criterio..... **Pág. 66**

**Figura II.2.8.**  
Priorización de sitios mediante el procedimiento de jerarquización..... **Pág. 69**

**Figura III.1.1.**  
Histograma con valores de importancias relativas de los criterios, obtenidos en forma Individual (SMV)..... **Pág. 75**

**Figura III.1.2.**  
Histograma con valores de importancias relativas de los criterios, obtenidos en grupo (Instituto de Geografía)..... **Pág. 76**

**Figura III.1.3.**  
Histograma con valores de importancias relativas de los criterios, obtenidos en grupo (Instituto Mexicano del Petróleo)..... **Pág. 77**

**Figura III.2.1.**  
Diagrama de flujo de los pasos más importantes para el desarrollo del procedimiento de jerarquización de sitios contaminados..... **Pág. 85**

**Gráfico I.1.**  
Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 1999..... **Pág. 15**

**Gráfico I.2.**  
Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 2000..... **Pág. 16**

<b>Gráfico I.3.</b> Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 2001.....	<b>Pág. 17</b>
<b>Gráfico I.4.</b> Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 2002.....	<b>Pág. 18</b>
<b>Gráfico I.5.</b> Volumen de hidrocarburos derramados en tierra por PEMEX durante los años de 1999 al 2002.....	<b>Pág. 19</b>
<b>Gráfico I.6.</b> Derrames de hidrocarburos ocurridos en instalaciones terrestres de PEMEX durante los años de 1999 al 2002.....	<b>Pág. 19</b>
<b>Gráfico II.2.1.</b> Porcentajes obtenidos de cada criterio de evaluación mediante la encuesta de opinión de expertos.....	<b>Pág. 38</b>
<b>Gráfico III.1.1.</b> Comportamiento de los resultados de priorización de las 6 poblaciones de datos.....	<b>Pág. 80</b>

## **Resumen**

La necesidad de satisfacer en la actualidad una mayor demanda de energéticos a nivel nacional e internacional, ha ocasionado el crecimiento de PEMEX, presentándose paralelamente algunos impactos sobre el medio ambiente (aire, agua y suelo). Siendo la contaminación de los suelos uno de los problemas más importantes para esta empresa.

La industria petrolera tiene que atender un número considerable de derrames de hidrocarburos al año, que llevan implícitos la afectación de suelos, agua subterránea y situaciones de alto riesgo a la integridad humana, particularmente, cuando estos eventos se suscitan en zonas urbanas. Los recursos, tanto económicos como técnicos, no bastan para hacer frente a todos los problemas de contaminación de suelos en forma simultánea, por lo que el presente estudio se considera de gran utilidad al proponer y desarrollar un esquema metodológico novedoso que permitirá priorizar actividades tanto de evaluación como de saneamiento de estos sitios, tomando como base criterios múltiples de carácter ambiental y social para la toma de decisiones.

Por lo que el presente estudio tiene como meta principal la de desarrollar un procedimiento que permita orientar y ubicar, en el marco de un esquema geográfico ambiental jerárquico, las actividades de evaluación y remediación de sitios contaminados por actividades propias de esta empresa.

El procedimiento de jerarquización objeto del presente estudio se realizó tomando como base parámetros tanto ambientales como sociales (criterios de decisión), y se basó en el método de evaluación de toma de decisiones mediante multicriterios (MCDM, siglas en ingles) apoyando este análisis con la técnica de AHP (Analytic Hierarchy Process) o Proceso analítico Jerárquico.

En el presente estudio se logró el desarrollo de cédulas de evaluación que contienen las principales características y los parámetros, llamados aquí criterios

de decisión (16), considerados como los mínimos necesarios para llevar a cabo una adecuada jerarquización de sitios contaminados y que serían los que solicite PEMEX a los proveedores de servicios de evaluación de sitios contaminados.

Se logró el desarrollo de un procedimiento novedoso que permitirá a PEMEX la identificación, jerarquización y con esto la priorización de los sitios con suelos contaminados por hidrocarburos, al cual se le incorpora la información como criterios de evaluación tanto sociales, como ambientales, que incluyó un análisis geográfico y de disciplinas asociadas como; la Geología, Ecología, Geoquímica, de Clima, de Población, Hidrológica, Geohidrológica, Química, etc., todo esto en un sistema integral que facilitará la toma de decisiones a PEMEX en cuanto a la atención de estos sitios.

Otro aspecto que se pudo identificar, es que los criterios sociales son los más importantes a considerar cuando se trate de darle prioridad en cuanto a la atención de un sitio contaminado.

Por último, se observó que para la obtención de resultados convincentes, es mejor llevar a cabo el análisis, no en forma individual, sino bajo opiniones y puntos de vista de grupos de trabajo de expertos, formados por especialistas relacionados con el ámbito medioambiental, y donde lo homogéneo o heterogéneos de los grupos no influyen significativamente en los resultados.

## **Abstract**

At the present time, the necessity to satisfy after the increasing demand of petroleum at national and international level, it has caused the growth of PEMEX, the main enterprise public of mexican government being presented some impacts parallel on the environment (air, water and soil). The contamination of the soils is one of the most important problems for this company.

The petroleum industry, has to assist a considerable number of spills of hydrocarbons per year that take implicit the affectation of soils, groundwater and risks to the human integrity, particularly, when these events are happened in urban areas. The resources so much economic as technicians they are not enough to make in front of all the problems of pollution of soils in simultaneous form, the goal of the present study is developing a methodological schema that will allow to prioritize activities of evaluation like of restoration of these places, taking like base multiple criterion of decision (environmental and social).

This study has like main goal the one of developing a procedure that allows to guide and to locate, in the mark of a hierarchical environmental geographical outline, the evaluation activities and restoration of polluted places for activities characteristic of PEMEX.

As the procedure hierarchical object of the present study it was commented it was carried taking like base parameters so much environmental as social (criterion of decision), and it was based on the appraisal method of Multicriteria Decisions Maker (MCDM) supporting this analysis with the technique of AHP (Analytic Hierarchy Process).

Presently study, the development of evaluation identifications was achieved that contain the main ones characteristic and the parameters, calls here criterion of decision (16), considered as the necessary minima to carry out a good hierarchical process of polluted places and that they would be those that PEMEX requests the suppliers of services of evaluation of polluted places.

The development of a novel procedure was achieved that will allow PEMEX the identification and hierarchical position of the places with soils contaminated by hydrocarbons, to which is incorporated the information like evaluation approaches so much social, as environmental that included a geographical analysis and of associate disciplines as; the Geology, Ecology, Geochemistry, of Climate, of Population, Hydrological, Geohydrological, Chemistry, etc., all this in an integral system that will facilitate the taking of decisions to PEMEX as for the attention of these places.

Another aspect that you could identify, is that the social criteria are the most important to consider when it is to give him priority as for the attention of a polluted place.

Lastly, it was seen that for the obtaining of good results and convincing, it is better to carry out the analysis, not in form singular and if low opinions and points of view of working groups, formed by specialists related with the environmental circles, and where the homogeneous or heterogeneous of the groups doesn't influence significantly in the results.

## **I. Introducción.**

En principio, se considera imprescindible conocer cómo se ubica México dentro de la producción y la economía mundial, y así tener un panorama general de la situación actual, con el fin de propiciar conciencia de la importancia que debe darse, no sólo a la parte económica y social, sino también a la ambiental.

La riqueza biológica de México y sus variados ecosistemas, patrimonio de las generaciones presentes y futuras, son de un valor global de tal magnitud, que superan con mucho las estimaciones económicas de todo el petróleo que pudiera existir en el país. Esto es comprensible, en tanto que cada una de las especies representa un eslabón de la compleja cadena de los procesos ecológicos que genera los servicios ambientales; además de que, en potencia, representan un recurso sujeto a algún tipo de uso o aprovechamiento directo o indirecto. La pérdida del capital natural tiene costos inaceptables e imposibles de sufragar.

Por otro lado, si bien se ha avanzado en el fortalecimiento de la economía nacional y en particular en el crecimiento de la industria petrolera, esto ha agravado los problemas entre los que se encuentra la degradación ambiental, la que se manifiesta en distintos grados de intensidad en las diversas regiones del país, así como en los diferentes medio como son, el agua, aire y suelo.

En esta investigación, los sitios con suelos contaminados por hidrocarburos son el punto central, cuyas repercusiones, ambientales, sociales y de seguridad, son múltiples y complejas, las alternativas de solución que aquí se plantean apoyarán con nuevos criterios de decisión a las actividades de diagnóstico y restauración de sitios afectados de una forma ordenada y sistemática, para lo cual se hace necesario la realización de un procedimiento de jerarquización para la atención de pasivos ambientales, considerando principalmente criterios de evaluación tanto ambientales como sociales.



## **I.1. La industria petrolera en México.**

Sin pretender profundizar más de lo necesario en el tema, es importante hacer mención de la relevancia y el significado que tiene en la actualidad la industria petrolera para la nación. México es el séptimo país en la producción mundial de hidrocarburos y gas natural, siendo esta la primera fuente de ingresos de divisas para el país. La industria exportadora mexicana de petróleo es la octava más importante del mundo (Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001- 2006, SEMARNAT, 2001).

Es innegable que la industria petrolera tiene un significado estratégico de primera magnitud, que se manifiesta por los niveles de contribución a la economía nacional. Por mencionar algunas cifras, durante el periodo 1995-1999, Petróleos Mexicanos (PEMEX) entregó al Gobierno Federal 854 mil millones de pesos por concepto de impuestos directos e indirectos, así como derechos de extracción (PEMEX, 2000).

En la actualidad, PEMEX produce 3,5 millones de barriles de crudo por día, de los cuales 1,6 millones barriles son exportados, obteniendo ingresos anuales brutos por mas de 44.000 millones de dólares y eroga cada año 1,720 millones de dólares en seguridad, protección ambiental y acciones para procesar productos limpios (<http://listas.rcp.net.pe/pipermail/medambien/2002-January/000128.html>).

El petróleo y sus derivados, se exportan a Canadá, Estados Unidos, Centroamérica, España, Francia, Yugoslavia, Japón e Israel (Ayllon & Chávez, 1994). Sin embargo, la necesidad de satisfacer día con día, una mayor demanda de energéticos a nivel nacional e internacional, ha ocasionado el crecimiento de esta empresa, presentándose paralelamente algunos impactos sobre el medio ambiente (aire, agua y suelo).

## **I.2. El problema de la contaminación del suelo por fugas y derrames de hidrocarburos en México.**

La contaminación del suelo por hidrocarburos es un evento frecuente en la mayoría de las instalaciones petroleras en el mundo y México no es la excepción. Este tipo de problemas tiene diversas fuentes, entre las que figuran: la rotura de los drenajes aceitosos, fallas en la hermeticidad en ductos y tanques de almacenamiento (superficiales y subterráneos), posibles fugas en plantas de proceso por falla en los materiales, etc. En los últimos años, un fenómeno que se ha venido dando cada vez con mayor frecuencia, es el derrame de hidrocarburos debido al descontrol de tomas clandestinas en los diferentes escenarios de la geografía nacional, produciendo un incremento en el número de pasivos ambientales, que con frecuencia producen daños de consideración al subsuelo y aguas freáticas y en otras ocasiones, provocan situaciones de alto riesgo a la integridad humana, particularmente, cuando estos eventos se suscitan en zonas urbanas.

El suelo y subsuelo constituyen un recurso natural difícilmente renovable, que desempeña funciones entre las que destaca su papel como medio filtrante durante la recarga del manto acuífero y la protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y las redes tróficas, además de ser el espacio donde se realizan las actividades agrícolas, ganaderas y soporte de la vegetación (Saval, 1995).

Los derrames de hidrocarburos afectan también ciertas propiedades químicas del suelo como lo es: aumento del carbono orgánico ya que el 75 % del carbono del petróleo crudo es oxidable; disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos; aumento del manganeso y el hierro intercambiable; aumento del fósforo disponible (SEMARNAP, 1996). Además de provocar en algunos casos situaciones de riesgo para la población y a la diversidad biológica, así como pérdidas en la producción ya sea por

afectaciones directas sobre el cultivo cuando los derrames ocurren en los campos de siembra o inclusive dentro de la propia paraestatal, cuando se tiene que reducir o parar la producción de destilados en las refinerías debido a derrames de diversos compuestos.

En comparación a la contaminación del aire y agua, en México se ha realizado poca investigación sobre este rubro, e incluso en lo relativo al marco normativo de restauración y conservación de suelos, hasta el año 2001, no existía norma alguna que mencionara valores permisibles de hidrocarburos en relación a la remediación o restauración de suelo. Sólo existían los criterios interinos de limpieza, desarrollados por el Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados, (PROFEPA, 1999). Fue hasta el 2002 que apareció la primera Norma Oficial Mexicana de emergencia, publicada el 20 de agosto en el Diario Oficial de la Federación (NOM-EM-138-ECOL-2002), que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración, la cual hace obligatorio la evaluación y restauración de suelos afectados por hidrocarburos (también llamados pasivos ambientales) y que por su naturaleza es obligatoria tanto para Petróleos Mexicanos como para las distintas empresas del sector público y privado en donde intervenga la compra, almacenamiento y uso de petróleo y sus combustibles derivados. Es importante mencionar que actualmente esta norma ya fue sustituida por el PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y restauración.

Para tener una idea del problema de contaminación de suelos por hidrocarburos, se puede mencionar que entre 1999 y el 2002 se registraron alrededor de 3018 derrames en tierra, lo que permite estimar que cada 12 hrs. se dio un derrame de hidrocarburos (Informes de Seguridad y Protección Ambiental de Petróleos

Mexicanos). Por lo que los sitios con suelos contaminados de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la actualidad se cuentan en cientos y estos incluyen: desde localidades puntuales, en donde los impactos pueden cuantificarse en unos cuantos metros cuadrados, hasta áreas de mayor extensión y de fuentes múltiples. Estos pasivos pudieran estar en la mayor proporción de los casos evaluados y saneados, en otro porcentaje sólo han sido evaluados, y en otros pudieran haberse iniciado las actividades de gestión con las autoridades ambientales, sin embargo, es tanta la información, tan heterogénea y los recursos limitados para su atención, que es muy difícil tener un control eficiente de esta problemática, así como para la definición de las estrategias de priorización para su atención.

La autoridad ambiental (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, PROFEPA) clasifica a las fugas y derrames dentro de lo que denomina como emergencias ambientales, incluyendo en éstas a las explosiones, fuegos y otros. Del total de emergencias ambientales que se tenían hasta el quinto bimestre del 2002, el 92% aproximadamente, correspondieron a los rubros de derrames y fugas.

Del total de las emergencias ambientales ocurridas en la industria petrolera en el periodo de 1997 al 2001, (PEMEX, 1999, 2000, 2001 y 2002) en promedio el 70% de las fugas o derrames, presentan afectación al suelo, en 30% al agua y 10% al aire. La suma de los porcentajes anteriores no suma el 100%, lo anterior es debido a que hay eventos que afectan a los tres recursos simultáneamente (PROFEPA, 2001).

Los problemas de contaminación de suelo son muchos y de diversas fuentes, estos pueden provenir tanto de la industria privada como la pública. Para el quinto bimestre del 2002, la PROFEPA había registrado alrededor de 314 fugas y derrames, correspondiéndole el 59% al sector público y el 41% al privado, como se muestra en el cuadro I.1.

**Cuadro I.1. Número de fugas y derrames reportados, para los sectores público y privado (PROFEPA, quinto bimestre del 2002).**

	Sector Público	Sector Privado
Fugas	5	13
Derrames	181	115
Total	186	128
Fuente: <a href="http://www.profepa.gob.mx/saa/audita91.htm">http://www.profepa.gob.mx/saa/audita91.htm</a>		

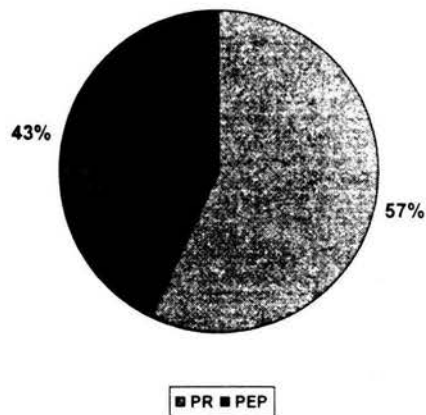
Las fugas y derrames de hidrocarburos y sustancias químicas, ocurren con mayor frecuencia dentro de las actividades de transportación. Los estados que presentaron más problemas en estos rubros durante el 2002 fueron: Tabasco, Veracruz, Campeche, Chiapas y Tamaulipas. (<http://www.profepa.gob.mx/saa/audita91.htm>)

Lo anterior recae nuevamente en la necesidad de elaborar un sistema de jerarquización de los sitios que en la actualidad se encuentran con problemas de contaminación. El número de pasivos ambientales de PEMEX es grande y crece día con día, los recursos económicos para diagnosticar y remediar estas afectaciones son limitados. Para ilustrar lo anterior, a continuación se presenta algunas cifras, todas ellas de carácter oficial, lo que permite dar una idea más clara y precisa del tamaño de la problemática de los derrames de hidrocarburos, que a su vez generan sitios contaminados.

En los informes anuales correspondientes de Seguridad y Medio Ambiente se realiza un balance de las fugas y derrames que son reportadas por los diferentes organismos subsidiarios de PEMEX, durante los años de 1999 al 2002. Por ejemplo en 1999 se reportaron un total de 856 derrames de hidrocarburos tanto en agua como en tierra, lo que representó un volumen total de hidrocarburos líquidos derramados de 24,529 barriles.

El volumen total de hidrocarburos derramados en tierra fue de 23,938 barriles, de los cuales el 57% aproximadamente fue consecuencia de 83 derrames ocurridos en instalaciones de PEMEX Refinación (PR). El volumen restante se debió a los 673 derrames en instalaciones de PEMEX Exploración y Producción (PEP) (Gráfico I.1 y Cuadro I.2. Fuente: Informe de Seguridad y Medio Ambiente, 1999).

Gráfico I.1. Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 1999.



Cuadro I.2. Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en 1999 por PEMEX. Los valores del volumen son expresados en barriles.

Filial	Derrames en Mar		Derrame en tierra		Total derramado	
	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado
PR	10	196	83	13653	93	13849
PEP	90	395	673	10285	763	10680
Totales	100	591	756	23938	856	24529

Fuente: Informe de Seguridad y Medio Ambiente, 1999  
<http://www.pemex.gob.mx/files/pdf/rpyderr2.pdf>

a. No incluye Terminales de Almacenamiento y Distribución.

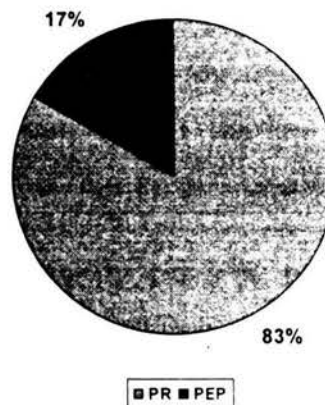
Se observa claramente que aunque el número de derrames ocurridos en instalaciones de PEP es mayor, estos fueron de menor envergadura considerando el volumen derramado, en comparación con los ocurridos en las instalaciones de PR, en los que el volumen por evento en promedio fue mucho mayor. Sin embargo, para la norma oficial mexicana antes mencionada, no hay diferencia y todos deben ser atendidos, nuevamente es necesario un sistema que marque prioridades y permita un mejor manejo de los recursos económicos destinados para la remediación.

Por otra parte, también es claro que los principales problemas provocados por los derrames fueron los que se presentaron en tierra con 23,937 barriles en 756 eventos, contra los 591 barriles que se derramaron en el mar en 100 casos.

De todo el volumen de hidrocarburos derramado en tierra por PR, el 94% se registró en las cuatro regiones o subgerencias de ductos del país. En el caso de PEP, 97% del volumen fue derramado en instalaciones en tierra.

Durante el año 2000, el volumen de hidrocarburos líquidos derramado por PEMEX fue del orden de los 44,484 barriles. De los cuales 43,949, fueron derramados en tierra. De estos el 83% fue consecuencia de 88 derrames que se suscitaron en instalaciones de PR. El volumen restante 7,284 barriles (17%) ocurrió en instalaciones de PEP (Gráfico I.2 y Cuadro I.3. Fuente: Informe de Seguridad y Medio Ambiente, 2000). De los derrames de PR, el 31% aproximadamente se debieron a tomas clandestinas.

Gráfico I.2. Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 2000.



**Cuadro I.3. Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en el 2000 por PEMEX. Los valores del volumen son expresados en barriles.**

Filial	Derrames en Mar		Derrame en tierra		Total derramado	
	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado
PR	2	13	88	36665	90	36678
PEP	52	522	1376	7284	1428	7806
Totales	54	535	1464	43949	1518	44484

Fuente: Informe de Seguridad Salud y Medio Ambiente 2000

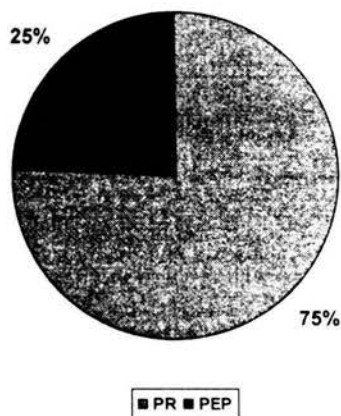
<http://www.pemex.gob.mx/index.cfm?action=contenido/section/138/categoria/20/analisis/100/fecha/2000>

Para fines prácticos todo el volumen derramado por PR se registró en las cuatro regiones o subgerencias de ductos del país. Para el caso de PEP, el 93% del volumen se derramó en instalaciones en tierra; en particular en oleoductos antiguos de las regiones Norte y Sur.

Los resultados de los derrames ocurridos durante el 2000, volvieron a ser mayores en tierra, esta vez con un mayor porcentaje que correspondió al 98.8% del volumen total derramado.

Para el año 2001, el volumen total de hidrocarburos derramados fue de 58,034 barriles (mar y tierra). De esta cantidad 57,653 se registraron en instalaciones terrestres. Presentándose el 75% del volumen derramado en PR y el 25% restante (14,160 barriles) en instalaciones de PEP (Gráfico I.3 y Cuadro I.4. Fuente: Informe de Seguridad y Medio Ambiente, 2001).

Gráfico I.3. Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 2001.



**Cuadro I.4. Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en el 2001 por PEMEX. Los valores del volumen son expresados en barriles.**

Filial	Derrames en Mar		Derrame en tierra		Total derramado	
	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado
PR	4	13	67	43493	71	43506
PEP	52	368	403	14160	455	14528
Totales	56	381	470	57653	526	58034

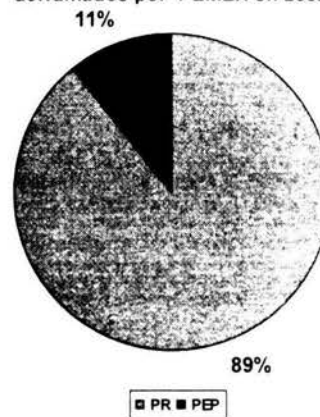
Fuente: Informe de Seguridad y Medio Ambiente 2001  
[http://www.pemex.gob.mx/files/pdf/denames\\_fugas\\_01\\_amb.pdf](http://www.pemex.gob.mx/files/pdf/denames_fugas_01_amb.pdf)

Al igual que el año anterior, prácticamente todo el volumen derramado por PEMEX Refinación se registró en las cuatro regiones de ductos del país, con la mayor incidencia (48%) en la Región Sureste (Sectores; Minatitlán, Villahermosa, Salina Cruz, Cd. Mendoza y Poza Rica). En el caso de PEMEX Exploración Producción, 97% del volumen se derramó en instalaciones en tierra.



Por último, para el año 2002, se derramaron tanto en mar como en tierra un total de 143,642 barriles. De estos 143,421 se derramaron en tierra, de los cuales 15, 456 se presentaron en instalaciones de PEMEX Exploración y Producción y 127,965 barriles en PEMEX Refinación, Correspondiéndole el 11 y 89% respectivamente del volumen total derramado en tierra (Gráfico I.4 y Cuadro I.5. Fuente: Informe de Seguridad y Medio Ambiente, 2002).

Gráfico I.4. Porcentajes de hidrocarburos derramados por PEMEX en 2002.



Cuadro I.5. Derrames de hidrocarburos (mar y tierra), reportados en el 2002 por PEMEX. Los valores del volumen son expresados en barriles.

Filial	Derrames en Mar		Derrame en tierra		Total derramado	
	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado	Número de derrames	Volumen derramado
PR	1	2	50	127965	51	127967
PEP	51	219	278	15456	329	15675
Totales	52	221	328	143421	380	143642

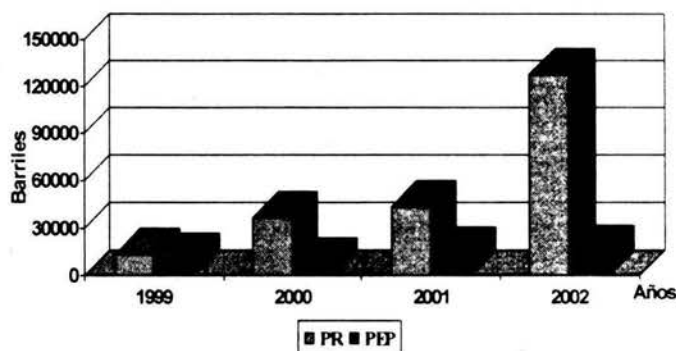
Fuente: Informe de Seguridad, Salud y Medio Ambiente, 2002  
<http://www.pemex.com.mx/seguridad/Proteccionambiental.pdf>

Como en todos los años anteriores (1999, 2000 y 2001), el volumen derramado siempre fue mayor en el medio terrestre. Se vuelve a repetir el comportamiento en cuanto al número de derrames, que sigue siendo mayor en PEP, sin embargo el mayor volumen derramado sigue correspondiendo a la filial de PR.

Sí se efectúa una integración de la información y su evolución en el tiempo apoyado por gráficos del comportamiento de las fugas y derrames producidos por los órganos subsidiarios de PEMEX Refinación y PEMEX Exploración y Producción, durante los años de 1999 al 2002, se obtiene lo siguiente.

En el gráfico I.5, se observa en forma evolutiva los volúmenes de hidrocarburos derramados en tierra por PEMEX Refinación (PR) y PEMEX Exploración Producción (PEP), durante el periodo de 1999 al 2002.

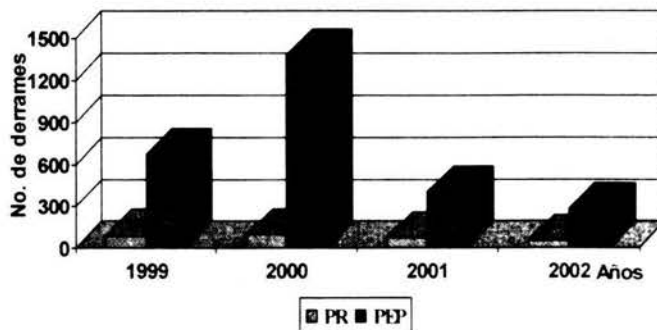
Gráfico I.5. Volumen de hidrocarburos derramados en tierra por PEMEX durante los años de 1999 al 2002



Como se aprecia en el gráfico I.5, el volumen derramado en suelo se ha ido incrementando cada año, lo cual es más claro para el caso de PEMEX Refinación (PR), donde el volumen derramado en todos los casos siempre ha sido mayor en comparación con el registrado para PEP

En el gráfico I.6. se incluyen los datos del número de derrames que se han producido en los años de 1999 al 2002, en instalaciones de PEMEX Refinación y Exploración y Producción.

Gráfico I.6. Derrames de hidrocarburos ocurridos en instalaciones terrestres de PEMEX durante los años de 1999 al 2002



Se observa en general un comportamiento al decremento después del 2000 en el número de derrames, conforme transcurre el tiempo, lo que pudiera hablar bien de las medidas implementadas por Petróleos Mexicanos en el mantenimiento de sus instalaciones durante los últimos años, sin embargo, parece ser que los derrames que han

ocurrido en tiempos recientes han sido de mayor envergadura, ya que la relación que se observa es que a menor número de derrames es mayor el volumen derramado (Gráficos I.5 y I.6).

En general, se advierte que la mayor cantidad de derrames que reportó PEMEX durante el periodo de 1999 al 2002, se presentó en instalaciones de PEMEX Exploración Producción. Sin embargo, el mayor volumen derramado en este mismo periodo, se registró en las instalaciones de PEMEX Refinación.

También es claro que en las instalaciones de PEP y PR se presenta más del 90% de los eventos de todo PEMEX. En el caso de PEP, la mayor parte de sus eventos ocurren por orden de importancia: en ductos, pozos petroleros, baterías de separación y estaciones de compresión.

Para el caso de PR la mayor parte de los incidentes suceden por orden de importancia, en ductos (transporte), refinerías, terminales de almacenamiento y distribución y, por último, en terminales marítimas.

En relación a las causas de los derrames en ductos de PEMEX refinación se deben en orden de importancia a: tomas clandestinas, daños o averías provocadas por terceros, corrosión y fallas en los materiales. Y en PEMEX Exploración y Producción los problemas de derrames se deben principalmente por problemas de corrosión (PROFEPA, 2001).

Los mayores problemas de derrames y fugas en PEMEX como se vio, suceden principalmente dentro de las actividades de distribución de los diferentes productos o subproductos que maneja la paraestatal. La mayor parte de esta actividad se realiza mediante el transporte por ductos mismos, que están distribuidos en gran parte de la República Mexicana, por lo que estos eventos se presentan en la mayor parte del territorio nacional, siendo en algunos estados donde se suscitan con mayor frecuencia (mayor infraestructura de PEMEX).

Lo anterior, deja ver claramente la magnitud de los problemas de contaminación del suelo producido por los derrames de hidrocarburos, que a su vez generan sitios o pasivos ambientales.

Por otra parte, la autoridad ambiental con base en los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana (PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003) publicada en el diario oficial de la Federación (19 de marzo del 2004) no hace distinción por el tamaño ni por la ubicación del problema y es mandatoria para todos los sitios con suelos contaminados por hidrocarburos. Sin embargo, la industria petrolera que tiene que atender un número considerable de derrames y pasivos ambientales al año (estudio de caso) que llevan implícitos la afectación de suelos por hidrocarburos, no tiene los recursos para hacer frente a todos los problemas de contaminación de suelos en forma simultánea, por lo que la presente investigación se considera será de gran utilidad al proponer y desarrollar un esquema novedoso que permitirá priorizar actividades tanto de evaluación como de saneamiento de estos sitios, tomando como base criterios múltiples de decisión (ambientales y sociales).

Por lo anterior, el presente estudio incluye la recopilación y el análisis de la información de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos, atendidos por las distintas dependencias de PEMEX relacionadas con las tareas de Protección Ambiental, con el fin de desarrollar un procedimiento que permita orientar y ubicar, en el marco de un esquema geográfico ambiental jerárquico, las actividades de evaluación y remediación de sitios contaminados por actividades propias de esta empresa.

Asimismo la propuesta se considera de gran utilidad para la industria petrolera, particularmente en las gerencias que concurren en el ámbito de la Protección Ambiental, ya que en éstas se desarrollan los planes de evaluación y saneamiento de sitios contaminados y en donde se apoyará la toma de decisiones con base en

multicriterios, dentro de un esquema jerárquico que pondere por su nivel de importancia, las actividades de evaluación y atención de los pasivos ambientales en materia de suelos y agua freática, que le permitirá justificar y priorizar sus compromisos ambientales frente a las autoridades, así mismo, se piensa que este es un estudio novedoso ya que genera elementos científicos de integración de disciplinas como la Geografía, Ecología, Geología, que deberán ser correlacionados de una manera innovativa.

### **I.3. Experiencias similares y antecedentes de estudios de análisis multi-criterio y jerarquización.**

Como antecedente, se tiene que existen varios estudios en los que para la solución de los problemas se han utilizado los métodos de evaluación con base a multicriterios, y en las que también se han aplicado como una herramienta auxiliar técnicas de jerarquización.

A continuación se mencionan algunos estudios y los rubros en los que fueron aplicadas las técnicas o procedimientos de toma de decisiones mediante multicriterios:

Ceballos, S. A. y López B. J. , 2003. Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico; Ceballos, S. A. y López B. J. , 2003. Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in Central Mexico: a multi-criteria and GIS approach; Marrero, M. M. y Petersson R. M., 2001. Aplicación de las técnicas multicriterio en la evaluación de alternativas de solución a un problema medio ambiental "Medición del efecto de económico de la contaminación del agua potable sobre la salud humana en una región de la provincia de Matanzas; Avila M. R. (FAO), 2000. Proyecto Regional "Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible" (Proyecto GCP/RLA/126/JPN), El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras;

Monterde Díaz, et. al. Aplicabilidad de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) en el análisis de factores de entorno en el diseño de productos industriales; INE, 2001. Evaluación ambiental comparativa de dos sitios considerados para la ubicación del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), Julio de 2001. SEMARNAT. Estudio realizado por la UNAM; Pilar, Jorge V., 2000. Modelo matemático de apoyo a la decisión aplicado al proceso de otorgamiento de becas en las facultades de la Universidad Nacional de Nordeste (UNNE). Comunicaciones científicas y tecnológicas. Chaco- Argentina; Díaz S. J. y López B. J. 2000. Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un SIG.

Como se aprecia, el método de toma de decisiones con base a multicriterios, ha sido en la última década ampliamente utilizado en diversas áreas del conocimiento, arrojando muy buenos resultados como lo corroboran los autores antes mencionados.

Con base en lo anterior se puede asumir la siguiente hipótesis:

En la priorización para la atención de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos, el uso de evaluaciones multicriterio, apoyado con técnicas como la de Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) son la mejor alternativa metodológica para la solución de este tipo de problemas.

Para confirmar esta postura se plantean los siguiente objetivos

#### **I.4. Objetivos.**

##### **a) Objetivo General**

Analizar la información de sitios representativos con suelos contaminados por hidrocarburos, pasivos ambientales y/o fugas y derrames de PEMEX a fin de

seleccionar y aplicar un procedimiento de priorización para su atención, basándose en su problemática ambiental y social.

**b) Objetivos particulares.**

Recopilar y analizar la información existente de sitios con suelos y/o agua freática contaminados y determinar la información adicional necesaria.

Determinar y ubicar cartográficamente sitios representativos con problemas de contaminación de suelo y/o agua subterránea y jerarquizar la información asociada a cada uno en cuanto a su estado actual para determinar indicadores de prioridad.

Diseñar y aplicar el procedimiento metodológico de jerarquización de los sitios contaminados, basado en sus repercusiones al ambiente y a la sociedad.

Documentar el procedimiento utilizado y ponerlo a consideración de la comunidad científica nacional, que concurre en la problemática del análisis geográfico ambiental.

## II. Metodología del estudio

Antes de iniciar propiamente con el desarrollo metodológico, se considera importante comentar que el sustento teórico, en el que se apoya la presente investigación, está relacionado con los métodos basados en la toma de decisiones o evaluaciones multicriterio (MCDM o EMC), que han sido utilizados con excelentes resultados como lo comentan en sus trabajos Thill, 1999 y Malczewski, 1999. El método es complementado con el apoyo de la técnica de jerarquización denominada Proceso Analítico Jerárquico (PAJ).

Para esta técnica es indispensable plantearse de forma clara un objetivo o meta, que para el presente estudio se trata de jerarquizar sitios con suelos contaminados para su atención en cuanto a la evaluación y su restauración. También es necesario la identificación y definición de los criterios y sus subcriterios de evaluación (sociales y ambientales), así como el de las alternativas (sitios contaminados).

Como se comentó, se trabajará con el apoyo de la técnica de Proceso Analítico Jerárquico (PAJ, AHP), técnica desarrollada por el Matemático Thomas L. Saaty, y que ha sido aplicada en estudios de diversa índole, así como en investigaciones de conflicto como terrorismo, en Irlanda del Norte y otros países, realizados por la Agencia de Control de Armas y Desarme a finales de la década de los 70's, y publicados en el libro editado por el Dr. Robert Kupperman de la Agencia (Saaty, 1980). Esta técnica, implica la descomposición del problema en criterios y subcriterios y las alternativas. Esta información se ordena en parejas, realizando comparaciones binarias (de a pares) para obtener sus pesos relativos.

Esta técnica tiene entre otras ventajas el que permite comparar criterios cualitativos y cuantitativos, por medio de juicios con fundamentos, con lo que se obtienen los pesos, lo que se traduce en prioridades, también permite identificar



cierto tipo de errores dentro del proceso de las evaluaciones pareadas, por medio del índice de inconsistencia, el cual identifica inconsistencias tanto de tipo lógico, así como de orden de magnitud. (Expert Choice, Inc., 2001, Avila, 2000, Saaty, 1980).

Como se aprecia esta investigación se encuentra dentro de la posición teórico metodológica de lo que es la Geografía Ambiental, la cual considera las interacciones que se presentan entre el espacio y el hombre. Este término surge a finales del siglo XIX, como un de los pilares más importantes de la geografía moderna, y tiene su raíz en la Geografía humana, es decir la nueva geografía de las relaciones hombre - medio, de carácter naturalista frente a la historia como producto social. Aunado a lo anterior, la geografía nace con un marcado signo ambiental, la primera definición de la geografía moderna tal y como se delinea a finales del siglo XIX es la siguiente; Cuerpo doctrinal que pretende dar una explicación totalizadora de lo social y físico, en el marco de una ciencia positiva, conteniendo una acentuada orientación "ambiental", siendo un componente natural en la constitución de la geografía moderna. Por otro lado, estaba orientada a descubrir y enunciar los principios generales, las tendencias básicas, las regularidades que rigen el desarrollo del medio y su influencia en el hombre (Ortega, 2000).

La postura ambientalista, fue y sigue siendo criticada, sin embargo, esta se ve apoyada por los geógrafos norteamericanos, los que abogan por configurar una geografía de las relaciones entre el medio y los seres vivos, entre el Medio y Hombre, pro tanto, de carácter general (W. Davis, citado en Ortega, 2000).

Para los geógrafos de formación física, la geografía se propone como una ciencia de las "relaciones tierra – seres vivos", lo formulan desde una óptica ambiental, que circunscribe la disciplina al estudio de las relaciones entre los diversos medios físicas terrestres y los seres vivos habitantes en ellos incluyendo a los humanos.

En 1998, un geógrafo que nada tiene que ver con la tradición positivista ni con la geografía naturalista, mantiene que la geografía “es el estudio de las relaciones entre sociedad y el medio natural” (Peet, 1998, citado en Ortega, 2000), concepción que sin duda es compartida por otros muchos de enfoques distintos.

El aspecto ambiental impregna la geografía moderna desde sus inicios (finales del siglo XIX), y penetra tan profundamente en el entendimiento de la misma, que llega a ser un componente destacado de la cultura geográfica actual.

Dentro de las múltiples perspectivas personales, los geógrafos vienen proponiendo en el contexto de la geografía actual, la necesidad de orientar a esta hacia los grandes problemas que caracterizan el mundo actual, y de acuerdo con la formación de cada uno, el énfasis se coloca en los problemas del medio ambiente, ordenación espacial, de la desigualdad o en los de la confrontación política.

Por último, es importante mencionar que la geografía sigue fragmentada en numerosas ramas y disciplinas, con escasa o nula comunicación entre sí, sin embargo, existe un grupo de geógrafos del presente que creen que hay posibilidades para la geografía del siglo XXI, si esta se orienta a la solución de los problemas comentados en el párrafo anterior y si lo hacen desde el compromiso con su tiempo (Ortega, 2000).

## **II.1. Recopilación, análisis y ubicación de la información de sitios contaminados.**

### ***II.1.1. Recopilación y validación de la información de sitios contaminados.***

Esta actividad inició con el análisis de la información recopilada sobre sitios con suelos contaminados por hidrocarburos. Se logró conseguir un listado (PEMEX, 2003) con información de sitios registrados hasta mayo del 2003, es importante

mencionar que los problemas de contaminación cubren áreas que van desde unos cuantos metros cuadrados, hasta algunas hectáreas, y que en algunos casos los sitios ya han sido atendidos en cuanto a su evaluación, otros ya estaban siendo saneados y algunos otros aún se encontraban en espera de ser evaluados. Partiendo de esta lista, se buscó en principio, todos aquellos lugares en los que se hubiera generado información mediante estudios de diagnóstico de la contaminación y los cuales estuvieran disponibles y al alcance.

La mayoría de los informes generados para cada sitio, se encuentran resguardados en cada entidad donde ocurrió el incidente y muy pocos informes se tienen en las oficinas respectivas de PEMEX en la Ciudad de México, por lo que la selección de los sitios dependió en gran medida de trabajos generados por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), ubicado en esta misma ciudad. A partir de esto se procedió con los siguientes pasos:

- El primer paso consistió en trabajar con aquellos sitios los cuales contaban con su informe técnico correspondiente, de estos se obtuvo información de algunos parámetros o criterios de evaluación, que se utilizaron como parte del cuestionario de "Opinión de expertos" (ver Sección II.2.1), elaborado para la selección y obtención de los criterios más importantes, en relación a la jerarquización, que se describirán en los siguientes subcapítulos.

De cada lugar, se obtuvo parte de la información como fue: la localización, nombre y tipo de la instalación, fecha de realización del estudio, profundidad del manto freático o nivel estático, tipo de contaminante, poblaciones cercanas, cuerpos de agua, vías de comunicación, tipo y uso del suelo.

- Como segundo paso, se realizó la clasificación y selección de la información de algunos lugares tomando en cuenta los siguientes criterios. Primero se consideró que estos estuvieran distribuidos en la mayor parte de la geografía del territorio nacional. Un segundo criterio fue el que los sitios seleccionados

tuvieran la mayor información posible, esto último con el objeto de hacer más eficiente y representativo el proceso de búsqueda y análisis de la información.

- Por último, en el tercer paso se realizó la validación de la información, que se llevó a cabo mediante la comparación de los datos obtenidos en bruto, que se encontraron registrados en tablas o cuadros con los que los originaron, es decir, con los archivos fuente, como fueron los informes técnicos y de campo.

### **II.1.2. Análisis y ubicación de sitios contaminados**

Al tomar como base lo comentado en el punto anterior y haber llevado a cabo el análisis de la información de los diferentes lugares contaminados, se logró la selección de 30 sitios, que se enlistan en el cuadro II.1.1. En el que se incluye información general de cada sitio como: el tipo y nombre de la instalación, población más cercana o donde se encuentra el sitio, coordenadas geográficas en grados y Universal Transversa de Mercator (UTM), claves de las cartas topográficas utilizadas para la ubicación de cada sitio, fecha del estudio correspondiente, estación meteorológica y la altitud (msnm) de la misma, cuya ubicación se busco fuera la más próxima a cada sitio seleccionado.

Por otro lado, también se elaboró un mapa georeferenciado de la República Mexicana (figura II.1.1), en este se ubicaron los 30 sitios seleccionados. Cabe hacer mención que la mayoría de las zonas estudiadas no tenían posición geográfica, por lo que fue necesario estimar su ubicación mediante las cartas topográficas escala 1:250,000, en formato digital (INEGI, segunda edición), y el uso del programa "Arc View", versión 3.2. Esto último fue con el propósito de obtener información geográfica más precisa de la cercanía a poblados (zonas urbanas), usos del suelo, cuerpos de agua, zonas industriales, etc., información que fue recuperada de estas fuentes y utilizada como criterios de decisión. De los 30 sitios seleccionados, 24 de estos contaban con sus informes técnicos correspondientes, que fueron realizados para PEMEX por el IMP.

La información obtenida de los reportes técnicos fue complementada tomando como base las recomendaciones en cuanto a los criterios de evaluación derivados de la encuesta de expertos (ver sección II.2.1) con lo encontrado en la literatura especializada y mapas temáticos, y así se logró obtener un marco más completo de las condiciones ambientales y sociales de cada sitio, tomando como base las características regionales definidas en términos de la Geografía.

Cuadro II.1.1. Información general de los 30 sitios seleccionados para llevar a cabo el análisis de jerarquización

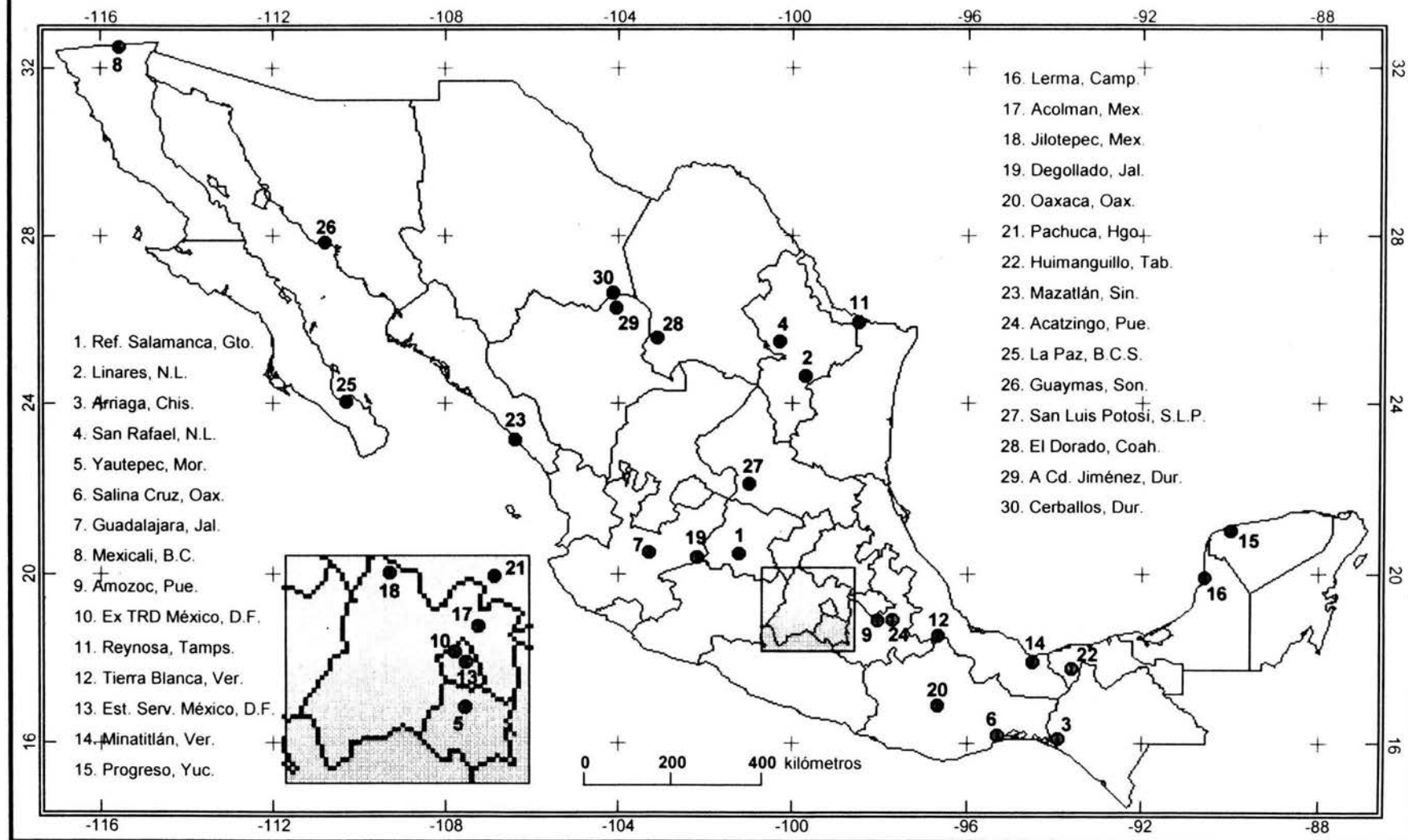
	Tipo de instalación	Nombre	Localidad	Sitio Específico	Latit. N	Long. W	UTM	UTM	Clave Carta Top 1:250000	Año	Mes	Estación meteorológica	Altitud (msnm)
1	Refinería	Ing. Antonio M. Amor	Salamanca, Gto.	Interior	20o34' 07"	101o11' 05"	272 258	2 275 840	F 14 - 10	1994	Septiembre	11096	1720
2	Est. Rebombeo	Est. Reb-5	Linares, NL	Interior	24o52' 36"	99o34' 44"	441 514	2 751 231	G 14 - 11	1995	Marzo	19035	350
3	T.A.D.	Amaga	Amaga, Chis.	Interior	16o14' 33"	93o54' 22"	403 147	1 796 055	E 15 - 11	1996	Junio	7204	60
4	T.A.D.	San Rafael	Gpe. Nvo. Leon	Interior	25o39' 36"	100o08' 47"	384 924	2 838 357	G 14 - 7	1995	Diciembre	19049	537
5	Est. Servicio	Gasolinera 452	Yautepec, Mor.	Gasolinera	18o52' 42"	99o04' 11"	492 626	2 087 336	E 14 - 5	1996	Febrero	17024	1150
6	Ducto	Poli. Ref.-Term. Marítima	Salina Cruz, Oax.	Km. 1+350	16o13' 07"	95o09' 49"	268 742	1 794 423	E 15 - 10	1996	Abril	20101	22
7	T.A.D.	La Nogalera	Guadalajara, Jal.	Interior	20o35' 30"	103o19' 21"	674 832	2 277 776	F 13 - 12	1996	Abril	14132	1593
8	T.A.D.	Mexicali	Mexicali, BCN	Interior	32o39' 13"	115o28' 41"	642 747	3 613 739	I 11 - 12	1996	Julio	2033	10
9	Ducto	Poli. Minatitlán - México	Amozoc, Pue.	Km. 408+654	19o02' 59"	98o03' 00"	599 968	2 106 563	E 14 - 2	1996	Octubre	21005	2160
10	Est. Servicio	Gasolinera 3002	México, D.F.	Gasolinera	19o27' 00"	99o10' 51"	481 002	2 150 572	E 14 - 2	1996	Octubre	9047	2340
11	CPG	Reynosa	Reynosa, Tam.	Interior	26o04' 30"	98o19' 05"	568 213	2 883 975	G 14 - 5	1997	Enero	28079	34
12	Ducto	Poli. N Teapa-Venta Carpio	Tierra Blanca, Ver.	Km. 216+709	18o29' 11"	96o23' 23"	775 563	2 045 972	E 14 - 6	1997	Febrero	30182	60
13	T.A.D.	18 de Marzo	México, D.F.	Interior	19o27' 15"	99o10' 44"	481 211	2 151 040	E 14 - 2	1997	Junio	9047	2340
14	Refinería	Gral. Lázaro Cárdenas	Minatitlán, Ver.	Interior	17o58' 41"	94o32' 41"	336 422	1 988 456	E 15 - 7	1998	Enero	30107	10
15	T.A.D.	Progreso	Progreso, Yuc.	Interior	21o14' 43"	89o39' 43"	223 750	2 351 516	F 16 - 7	1998	Junio	31044	14
16	T.A.D.	Lerma	Lerma, Camp.	Interior	19o48' 24"	90o35' 33"	752 153	2 191 825	E 15 - 3	1998	Septiembre	4053	3
17	Ducto	Poli. La Cima - Azcapotzalco	Acolman, Mex.	Km. 202+000	19o38' 05"	98o55' 15"	508 276	2 171 005	E 14 - 2	1999	Febrero	15263	2262
18	Ducto	Poli. Tula - Toluca	Jilotepec, Edo. Mex.	Km. 41 + 300	20o03' 47"	99o37' 58"	433 810	2 218 504	F 14 - 11	1998	Septiembre	15064	2600
19	Ducto	Polid. Salamanca Guadalajara	Degollado, Jal.	Km. 121 + 800	20o26' 35"	102o09' 25"	796 574	2 262 999	F 13 - 12	1999	Mayo	14302	1799
20	T.A.D.	Oaxaca	Oaxaca, Oax.	Interior	17o01' 59"	96o37' 00"	753 666	1 884 806	E 14 - 9	2000	Septiembre	20079	1550
21	T.A.D.	Pachuca	Pachuca, Hgo.	Interior	20o05' 59"	98o45' 00"	526 138	2 222 465	F 14 - 11	2000	Septiembre	13056	2435
22	Ducto	Polid. Minatitlán Villa Hermosa	Ejido Benito Juárez Huamanguillo, Tab.	Km. 102 + 000	17o50' 32"	93o24' 34"	456 601	1 972 784	E 15 - 8	2001	Agosto	27017	193
23	Ducto	Combustoleoducto Esperanza-CFE	Mazatlán, Sin.	Km. 10 + 370	23o12o53'	106o22o16o'	359 680	2 567 808	F 13 - 1	2001	Septiembre	25135	10
24	Ducto	Oleod. Nvo. Teapa - V. Carpio	Acatzingo, Pue.	Km. 407 + 640	18o58' 06"	97o46' 53"	628 288	2 097 745	E 14 - 6	2002	Marzo	21005	2135
25	TAD	La Paz	La Paz, B.C.S.	Interior	24o08' 08"	110o18' 49"	569 750	2 669 251	G 12 - 10	2002	Febrero	3074	32
26	TAD	Guaymas	Guaymas, Son.	Interior	27o55' 23"	110o54' 51"	508 446	3 088 504	G 12 - 2	2002	Febrero	26122	26
27	TAD	San Luis Potosí	San Luis Potosí	Interior	22o10' 17"	100o58' 07"	297 005	2 452 981	F 14 - 4	2002	Febrero	24069	1877
28	Ducto	Válvula de Secc. Bolívar	El Dorado, Coahuila	Tramo El dorado - Chávez	25o46' 03"	103o00' 57"	698 977	2 851 249	G 13 - 9	2003	Noviembre	5028	1112
29	Ducto	Válvula de Secc. Conejos	Cd. Jiménez, Chihuahua	Tramo Peronal - Jiménez	26o19' 12"	103o55' 41"	606 980	2 911 390	G 13 - 6	2003	Noviembre	8171	1263
30	Ducto	Válvula de Secc. Ceballos	Ceballos, Durango	Tramo Peronal - Jiménez	26o30' 17"	104o06' 30"	588 856	2 931 710	G 13 - 5	2003	Noviembre	10005	1188

Nota: TAD.- Terminal de Almacenamiento y Distribución; CPG.- Complejo Procesador de Gas

Fuente: Elaborado por el autor

Fuente: Elaborado por el autor

**Figura II.1.1. Ubicación de los 30 sitios seleccionados considerados en el modelo de jerarquización.**



## **II.2. Desarrollo de la metodología para la jerarquización de sitios contaminados.**

En esta sección, en primera instancia se incluye un procedimiento para la identificación y selección de los criterios que serán los que se deban incluir en el análisis de jerárquico, posteriormente, se verá la creación del diseño del modelo y la aplicación del método de priorización.

### ***II.2.1. Procedimiento para la identificación y selección de los criterios de decisión (Sociales y ambientales).***

Uno de los pasos más importantes dentro de las técnicas de análisis para la toma de decisiones basados en multicriterios, es sin duda la identificación y selección de los criterios de evaluación o de decisión, que para el presente estudio son sociales y ambientales, y que de una u otra forma se encuentran relacionados con la problemática ambiental que para este caso se refiere a sitios con suelos contaminados por hidrocarburos. Los criterios seleccionados deben de ser lo suficientemente claros y estar bien definidos y explicados, lo anterior con el objeto de evitar confusiones a la hora de ser utilizados en el ejercicio de las comparaciones pareadas y el otorgamiento de las importancias relativas para la jerarquización (técnica AHP, Saaty, 1980).

Como parte del procedimiento para la jerarquización y con esto la priorización de sitios contaminados, la identificación y selección de los criterios se llevo a cabo mediante el diseño y aplicación de un cuestionario llamado "Opinión de Expertos", denominado así ya que se aplicó a profesionales con experiencia en relación a la evaluación y caracterización de sitios contaminados y a quienes se les pidió identificar y comentar los criterios más utilizados por ellos en este campo del quehacer ambiental, al respecto, es importante mencionar que ninguno de los especialistas que participaron en este proceso consideraron los aspectos económicos como criterios en forma directa para ser tomados en cuenta en el análisis de jerarquización de sitios contaminados, en opinión del autor, no es que



no sea importante lo relacionado con la parte económica, sino más bien porque existen ciertos vacíos legales, relacionados con lo difícil que es tratar de estimar el costo económico por ciertos daños ambientales.

Esta forma de llevar a cabo la selección de criterios de decisión (grupo de expertos), se considera de mayor confiabilidad y de mejor calidad, en comparación al que es realizado solamente por una persona, ya que en el primero se toman en cuenta diferentes puntos de vista de los especialistas (expertos) a los que se les pidió su opinión mediante el cuestionario.

En el anexo 1 se puede consultar el formato del cuestionario elaborado para este fin, el cual consta de tres partes; la primera destinada a obtener los datos generales del profesional, la segunda la forma una relación de criterios de evaluación (sociales y ambientales), previamente seleccionados por el autor y se presentaba a los encuestados con el propósito de que dieran su opinión referente a si estos son o no criterios que ellos consideraban útiles en la priorización de programas para la atención de sitios con suelos contaminados con hidrocarburos. Por último, la tercera parte estaba diseñada de manera tal que el experto o profesional, tuviera la libertad de agregar cualquier otro parámetro o criterio de evaluación que considerara de importancia para cumplir con el objetivo o meta de priorización comentada anteriormente.

Los cuestionarios fueron distribuidos a diferentes profesionales (Geógrafos, Biólogos, Ingenieros Químicos, Ingenieros Ambientales, Arquitectos Paisajistas, Ingenieros Geólogos, y estudiantes de maestría en geografía ambiental, ordenamiento territorial y sociedad y territorio, tanto de la UNAM, como de diversas áreas del IMP (especialistas en Evaluación y Remediación de Suelos así como en Evaluación de Riesgo Ambiental). El cuestionario de opinión, fue aplicado a un total de 33 profesionales y expertos, de los cuales se recibió respuesta de 22,

lo que corresponde a un 66.66% de los encuestados. En el cuadro II.2.1 se muestran los resultados obtenidos.

Es importante mencionar que las opiniones de los profesionales no sólo fue sobre el papel que juegan los criterios de decisión en el proceso de jerarquización, sino también aportaron ideas sobre los nombres de los criterios, por lo que en algunos casos fueron renombrados con el objeto de se tuviera una mejor y más clara idea en cuanto al significado y propósito de los mismos.

***a) Resultados del proceso de la selección de criterios de decisión.***

En el cuadro II.2.1 se muestra el resumen de resultados que se obtuvieron de las encuestas de opinión. Incluye las profesiones de los participantes así como los criterios de evaluación que fueron seleccionados por los expertos y que hicieron un total de 23. En la parte inferior figuran varios campos numéricos: el primero (número de expertos), que representa la cantidad de profesionales que estuvieron de acuerdo con cada parámetro; el segundo (% por criterio), corresponde a la proporción de preferencia obtenida en cada criterio; en tercer lugar (% correspondiente a cada criterio) este es el valor que le correspondió a cada criterio considerando el universo de datos y por último (% acumulado) que es la suma de los porcentajes individuales, el cual fue tomado en cuenta para la selección de los criterios que serán incluidos dentro del análisis de jerarquización de sitios contaminados.

**Cuadro II.2.1. Criterios seleccionados y resultados obtenidos de la aplicación de la encuesta “Opinión de Expertos”**

	Especialidad	Tipo de contaminante	Precipitación	Temperatura	Fallas o Fracturas	Tipo de suelo (permeabilidad)	Uso de suelo	Grupos vulnerables	Afectación a infraestructura urbana	Centros de población más cercanos (Total de habitantes)	Hidrología Superficial	Aguas Subterráneas
1	Arquitecto Paisajista 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	Geógrafa 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	Ingeniero Ambiental 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	Biólogo M en Edafología	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	Dra. En Ecología	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	Geógrafo 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Geógrafa 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	Geógrafa 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	Biólogo 1er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	Ing Químico Industrial	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	Biólogo M en C. (Computación)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	Biólogo 3er Semestre M. Politécnico	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	Ing Geólogo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Biólogo 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	Lic Planeación Territorial 3er Semestre M.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	Ing Químico Industrial	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	Ing Agrónomo 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	Ing Bioquímico y M. en Biotecnología	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	Ing Geólogo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	Ing Geólogo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	Ingeniero Químico	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	Biólogo 3er Semestre M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	<b>Número de expertos</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>21</b>
	<b>% Por criterio (valor de importancia)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>95.45</b>	<b>95.45</b>
	<b>% correspondiente a cada criterio</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>7.28</b>	<b>6.95</b>	<b>6.95</b>
	<b>% Acumulado</b>	<b>7.28</b>	<b>14.56</b>	<b>21.85</b>	<b>29.13</b>	<b>36.42</b>	<b>43.70</b>	<b>50.99</b>	<b>58.27</b>	<b>65.56</b>	<b>72.51</b>	<b>79.47</b>

Fuente: Elaborado por el autor

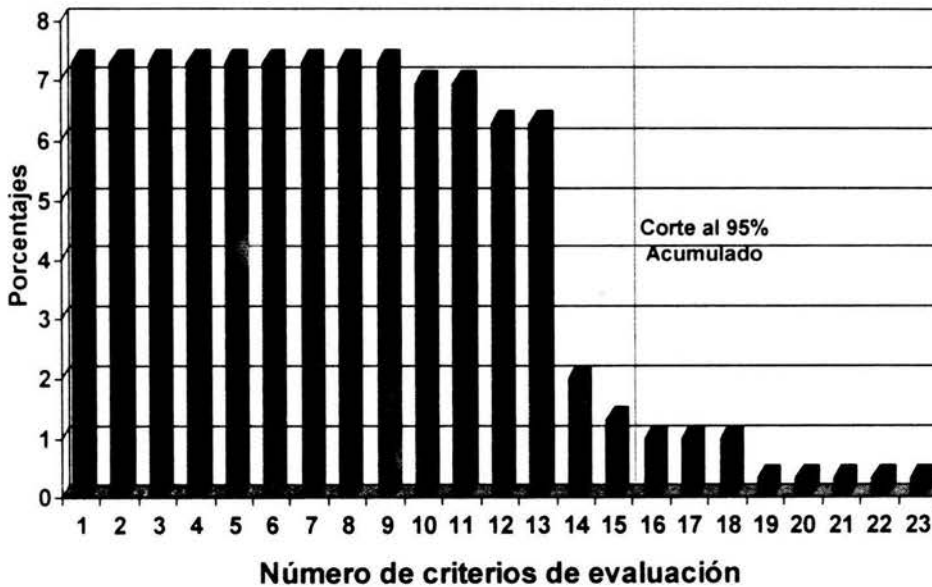
**Continuación...Cuadro II.2.1. Criterios seleccionados y resultados obtenidos de la aplicación de la encuesta "Opinión de Expertos"**

	Especialidad	Tipo de vegetación	Cecanías ANP	Vías de comunicación	Pendiente del terreno	Tenencia o propiedad de la tierra	Nivel socioeconómico	Densidad Poblacional	Zonas arqueológicas	Organizaciones ambientalistas	Cantidad de HC derramado	Especies endémicas o P.Extinción	Fauna existente
1	Arquitecto Paisajista 3er. Semestre M.	1	1						1				
2	Geógrafa 3er. Semestre M.			1		1							
3	Ingeniero Ambiental 3er. Semestre M.	1	1										
4	Biólogo M. en Edafología	1	1										
5	Dra. En Ecología	1	1		1								
6	Geógrafo 3er. Semestre M.	1	1			1					1		1
7	Geógrafa 3er. Semestre M.	1	1		1		1						
8	Geógrafa 3er. Semestre M.	1	1	1									
9	Biólogo 1er. Semestre M.	1	1										
10	Ing. Químico Industrial	1	1										
11	Biólogo M. en C. (Computación)	1				1		1				1	
12	Biólogo 3er. Semestre M. Politécnico												
13	Ing. Geólogo	1	1										
14	Biólogo 3er. Semestre M.	1	1	1	1		1	1					
15	Lic. Planeación Territorial 3er. Semestre M.	1	1	1				1					
16	Ing. Químico Industrial		1										
17	Ing. Agrónomo 3er. Semestre M.	1	1				1			1			
18	Ing. Bioquímico y M. en Biotecnología	1	1										
19	Ing. Geólogo	1	1										
20	Ing. Geólogo	1	1										
21	Ingeniero Químico	1	1	1									
22	Biólogo 3er. Semestre M.	1	1	1	1								
		19	19	6	4	3	3	3	1	1	1	1	1
		86.36	86.36	27.27	18.18	13.64	13.64	13.64	4.55	4.55	4.55	4.55	4.55
		6.29	6.29	1.99	1.32	0.99	0.99	0.99	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
		85.76	92.05	94.03	95.36	96.35	97.35	98.34	98.67	99.00	99.33	99.66	100.00

Fuente: Elaborado por el autor

De los resultados del porcentaje correspondiente a cada criterio mostrados en el cuadro anterior, se elaboró el gráfico II.2.1, en la cual están incluidos de nueva cuenta los 23 criterios que fueron identificados por los profesionales (expertos), se marca con una línea vertical el límite de los 15 criterios de decisión que representan el 95% acumulado del universo de los datos, además de corresponderles un porcentaje individual no menor al 1 %, considerando estos dos límites se definieron que estos serán los criterios de evaluación que se

**Gráfico II.2.1. Porcentajes obtenidos de cada criterio de evaluación mediante encuesta de opinión de expertos**



Fuente: Elaborado por el autor

considerarán para llevar a cabo el análisis de jerarquización de sitios contaminados por hidrocarburos. El 5% restante son criterios excepcionales que no marcan la preferencia general de los entrevistados. Sin embargo, se agregó un criterio más a la lista de los 15 aquí seleccionados, este criterio fue el nivel de aguas freáticas (NAF) o nivel estático (NE), que esta investigación considera como de suma importancia en la evaluación y diagnóstico de suelos contaminados por hidrocarburos, lo que se relaciona con el análisis de jerarquización.

Los criterios de evaluación o de decisión seleccionados mediante el procedimiento antes descrito son los siguientes:

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| 1. Tipo de contaminante                | 9. Cercanías a centros de población   |
| 2. Precipitación                       | 10. Hidrología superficial            |
| 3. Temperatura                         | 11. Aguas subterráneas                |
| 4. Fallas o Fracturas                  | 12. Tipo de vegetación                |
| 5. Tipo de suelo                       | 13. Áreas Naturales Protegidas        |
| 6. Uso de suelo                        | 14. Vías de Comunicación              |
| 7. Grupos vulnerables                  | 15. Pendiente del terreno             |
| 8. Afectación a infraestructura urbana | 16. Nivel de agua freática o estático |

Aquí es importante aclarar que el orden en el que aparecen los criterios, no significa que el primero sea el que mayor proporción contribuye a la jerarquización o que el último lo haga menos, la numeración sólo es con el fin de indicar el número de criterios seleccionados, el peso relativo de cada uno será obtenido mediante la comparación binaria, que forma parte del procedimiento analítico jerárquico (Saaty, 1980) (ver sección II.2.2).

***b) Definición e importancia de los criterios seleccionados.***

Con el objeto de tener una idea de cada criterio seleccionado y no exista confusión o duda a la hora de asignar los pesos relativos de importancia dentro del procedimiento de jerarquización, se considera conveniente para este caso, dar una definición clara y sencilla de cada criterio.

Aquí es importante señalar, que cuando se habla de peligro este se define como la ocurrencia o amenaza de ocurrencia de un acontecimiento natural o antrópico. Esta definición de peligro se refiere al fenómeno tanto en acto como en potencia, y siendo más precisos en la definición esta quedaría como **peligro ambiental** y es cuando el evento que causa el perjuicio tiene causas combinadas, es decir naturales y/o Producidas por el hombre o antrópicas (Aneas de Castro, (2000):

**Tipo de contaminante.**- Dependiendo del tipo hidrocarburo derramado representará mayor o menor peligro de incendio o explosión, así como posibles daños a la salud al inhalar vapores orgánicos en el lugar del incidente. Por ejemplo, las gasolinas (hidrocarburos más ligeros) son las que representarían un mayor peligro y daños a la salud en comparación a compuestos más pesados como los combustóleos.

**Precipitación.**- Su importancia radica en que es un criterio que puede en un momento dado dispersar más el hidrocarburo, tanto en forma vertical como horizontal, por lo que en lugares con mayor precipitación se presentarían las mayores probabilidades de dispersión.

**Temperatura.**- Este es un criterio de evaluación, el cual presenta efectos sinérgicos con el hidrocarburo derramado, aumentando o disminuyendo la probabilidad o peligro de incendio o explosión, ya que a temperaturas más altas, el riesgo de formar atmósfera explosivas es mayor, así como el de generar vapores orgánicos peligrosos para la salud.

**Fallas o Fracturas.**- Estos fenómenos, deben ser considerados en un análisis de jerarquización de sitios contaminados, al representar una condición de alto riesgo de contaminación de aguas subterráneas, ya que al estar presentes, estas actúan como vías de conducción del hidrocarburo derramado en la superficie hacia el subsuelo.

**Tipo de suelo (Permeabilidad).**- A mayor permeabilidad del suelo tomando en cuenta su textura, mayor será la probabilidad de aumentar la distribución del hidrocarburo, favoreciendo con esto la posible contaminación de los acuíferos.

**Uso de suelo.**- Dependiendo del tipo de uso de suelo, las pérdidas económicas por un derrame serán mayores o menores, así en un terreno que tiene uso

agrícola las pérdidas serán mayores que en una zona de recreación, o que en una zona residencial – comercial, etc.

**Grupos vulnerable.**- Se refiere al grupo de individuos que son más o menos vulnerables cuando se presenta un derrame, así cuando el derrame ocurre en una zona donde la población presenta un mayor número de niños este grupo se considera de mayor vulnerabilidad que el de un grupo de adultos, como podría ocurrir por ejemplo en una zona industrial.

**Afectación a infraestructura urbana.**- Esta orientado a los daños o afectaciones que pudiera producir un incidente o derrame de hidrocarburos al drenaje, sistema de distribución de agua potable o no presentar ningún daño. Es lógico que la afectación al agua sería el efecto más grave que implicaría un derrame de hidrocarburos para la población.

**Centros de población más cercanos (Total de habitantes).**- Representa la probabilidad de dañar a un mayor o menor número de personas (o sin afectación) al producirse un derrame de hidrocarburos, ya sea en, o cerca de un centro de población.

**Hidrología superficial.**- Fue seleccionado por la importancia que representa el que los cuerpos de agua superficiales sean contaminados por un derrame, y lo que esto implica, tanto para el ambiente, como para el humano, y se considera que será mayor el daño cuando el cuerpo de agua sea de características perennes y su cercanía al punto del derrame sea menor.

**Aguas subterráneas.**- Este es un recurso muy explotado en el país y su contaminación representaría un riesgo muy alto en cuanto a daños a la salud, así como pérdidas incalculables a la industria. Por lo que este criterio es uno de los más importantes a ser considerado dentro del análisis de jerarquización y con esto la priorización para la atención de sitios contaminados.



**Nivel de aguas freáticas (NAF) o nivel estático (NE).**- Aunque este parámetro como se comentó en su oportunidad, no fue resultado del procedimiento de selección de criterios, se considera importante para formar parte del análisis de jerarquización, ya que la probabilidad de que un acuífero sea o no contaminado se relaciona con la cercanía a la superficie (esto sin ignorar el tipo de suelo, criterio ya comentado) donde ocurrió el derrame, por lo que acuíferos someros tendrán una mayor probabilidad de ser contaminados, que los que se encuentran a mayores profundidades.

**Tipo de vegetación.**- El peso de este criterio se basa en cuales son los tipos de vegetación más o menos productivos (Producción Primaria neta), así como en su mayor o menor diversidad de especies, así entonces una selva será la que sufra el mayor daño si se llegara a presentar un derrame en este, ya que estos ecosistemas son los más productivos (Whittaker, 1975, citado en Krebs, 1985) y de mayor diversidad biológica (Rzedowski, 1993, citado en Challenger, 1998), en comparación de un ecosistema de vegetación desértica o semidesértica, la cual representa una menor productividad biológica y también una menor diversidad.

**Afectación a Áreas Naturales Protegidas (ANP).**- Su relevancia estriba en la importancia que tienen estas áreas desde el punto de vista de la ecología, ya que son porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde los ambientes originales no ha sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas, esto contenido dentro de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de 1996 (SEMARNAP, 1996 y SEMARNAP, 1997). Por lo que un problema de fuga o derrame en estas zonas requeriría de una atención prioritaria.

**Vías de comunicación.**- Se refiere a la posible afectación de carreteras, vías férreas, puentes, etc., que pudiera provocar un incidente de fuga o derrame. Lo

que representaría pérdidas económicas por la demora en la transportación y entrega de productos de diversa índole, así como de afectaciones a terceros y al patrimonio de la nación.

**Pendiente del terreno.**- El grado de inclinación de una pendiente pudiera ser causante de un mayor o menor daño ya que al existir una mayor inclinación del terreno favorecería una mayor dispersión y, por lo tanto, un incremento de la extensión dañada por el derrame.

Una vez obtenidos y definidos los criterios que serán utilizados en el modelo que se aplicará para la obtención de la jerarquización y priorización en cuanto a la atención de los sitios contaminados, el siguiente paso es determinar los atributos o subcriterios de cada uno de ellos, paso que será discutido en el subcapítulo que a continuación se detalla.

### **II.2.2. Aplicación y evaluación del procedimiento jerárquico.**

Como parte fundamental para la elaboración del procedimiento de jerarquización y priorización de sitios contaminados, meta del presente estudio, se diseñó un esquema de ponderación de la información que se basa en la aplicación de las técnicas para la toma de decisiones con base en multicriterios (MCDM, por sus siglas en inglés), esto basado en relación a las implicaciones que tiene el seleccionar uno u otro sitio como prioritario para su atención. Para lograr lo anterior se consideró necesario identificar y seleccionar ciertos criterios de evaluación y sus subdivisiones (subcriterios) que se consideran íntimamente relacionados con el problema de sitios contaminados, los cuales fueron tanto ambientales como sociales, y que resultaron como producto de la aplicación de las encuestas de "opinión de experto".

Hasta aquí ya se tienen la selección de las alternativas (30 sitios contaminados) y los criterios de evaluación seleccionados (16), además de contar con la meta u objetivo principal del presente estudio. Los tres elementos antes mencionados son la parte medular que integra un análisis de evaluación multicriterio (Thill, 1999 y Malczewski, 1999).

#### **a) Subcriterios de decisión y fuentes de información.**

En el subcapítulo anterior, se realizó la selección de los criterios de decisión, sin embargo, fue necesario desagregar aún más la información con objeto de contar con elementos de ponderación a mayor detalle y más representativos dentro del proceso de jerarquización, lo cual se consiguió a través de la especificación de los subcriterios, que se indican en la parte inferior del cuadro II.2.2 (Pág. 52), en este también se muestran los datos nominales de cada uno de los criterios para cada sitio. Asimismo en el cuadro II.2.3 (Pág. 54), se presenta la relación de las cartas temáticas que se utilizaron como complemento para la información de los diferentes sitios seleccionados. Por lo que antes de iniciar con la descripción y

aplicación del procedimiento de ponderación de sitios contaminados, se deben contar aparte de los criterios de evaluación y su importancia descritos en el subcapítulo anterior, la división de estos en subcriterios; a continuación se muestra como fueron divididos, su descripción y de donde se originaron, incluyendo los valores nominales correspondientes para cada sitio:

**Tipo de Contaminante.**- La importancia de este criterio en la jerarquización de sitios contaminados radica en el peligro que representa el tipo de hidrocarburo en el ambiente. La peligrosidad esta determinada por la cantidad de compuestos ligeros que contenga, así un combustible con más compuestos ligeros será un compuesto más peligroso. Las características antes mencionadas son reflejadas con las pruebas de destilación, en las cuales se obtienen el rango de compuestos ligeros y pesados que contiene cada combustible (Temperatura Inicial y final de ebullición, PEMEX, 1998). Con este razonamiento, se puede subdividir en subcriterios este criterio, por lo que el orden de peligrosidad de los diferentes combustibles es el siguiente:

- a) Gasavión
- b) Gasolinas
- c) Gasolina-Diesel-gasolina
- d) Turbosina
- e) Diesel
- f) Crudo
- g) Combustóleo
- h) Mezcla con pesados

El tipo de hidrocarburo derramado fue obtenido principalmente de los informes técnicos generados para cada sitio o de la relación de sitios contaminados por derrames facilitada por PEMEX (PEMEX, 2003).

**Precipitación Media Anual (mm).**- Como la importancia de este criterio depende de la cantidad de lluvia que se registre en un lugar determinado, medida en mm, entonces también puede ser dividido en subcriterios mediante la selección de rangos de precipitación, así que al tomar en cuenta todos los valores registrados

para los sitios seleccionados (cuadro II.2.2), que fueron obtenidos mediante la base de datos (BD) ERIC-II (IMTA, 2000) y calculados en Excel, se tienen 3 rangos de precipitación y son los siguientes:

- a) Alta.- > 700
- b) Media.- 300 a 700
- c) Baja.- < 300

Es importante mencionar, que para este caso se consideró la información que se tenía registrada del año de 1940 a la más reciente en la estación meteorológica del sitio, o en el caso de no existir o carecer de información se seleccionaba la más cercana.

Cabe señalar que en el procedimiento de jerarquización pueden utilizarse subcriterios cualitativos o cuantitativos, estos últimos también llamados datos duros o numéricos y en éste caso lo que varía son las fórmulas que tiene el sistema para calcular la jerarquización como lo son: la creciente (*increasing*) y decreciente (*decreasing*), en principio, se usan cuando existen datos duros y se detecta una relación ya sea directa o inversa entre el criterio de evaluación en cuestión y la meta de la jerarquización.

**Temperatura media anual (°C).**- Influye en aumentar o disminuir la peligrosidad o riesgo del hidrocarburo derramado en forma directa, ya que al haber temperaturas altas en el sitio del derrame el riesgo de incendio o explosión es mayor y viceversa, así como el de generar más o menos vapores orgánicos dañinos para la salud. Al igual que para el caso anterior se consideró conveniente dividir en subcriterios mediante rangos de temperatura que fueron obtenidos de la BD ERIC-II (año 1940 al más reciente) y quedaron como sigue:

- a) Alta.- > 30
- b) Media.- 26 - 30
- c) Baja.- < 26

También se consideran los datos duros o numéricos para el caso del uso de las fórmulas (increasing y decreasing en el modelo). Para el caso de este criterio, fueron consideradas las temperaturas máximas registradas en cada sitio, lo anterior es con el objeto de no minimizar el riesgo, ya que son las temperaturas más altas, las que tienen la mayor probabilidad en cuanto a producir un mayor daño la ambiente.

**Fallas o fracturas (Distancia (Km.).-** Se consideró conveniente dividir este criterio en 3 subcriterios, relacionados con la distancia al sitio en cuestión. También como en el caso anterior se consideraron los datos numéricos de esas distancias para el caso del uso de las fórmulas (increasing y decreasing en el modelo). Después de haber ubicado cada sitio y medir las distancias entre cada uno de ellos mediante las cartas geológicas (esc. 1:250, 000) con la presencia de alguna falla o fractura, se lograron establecer los siguientes rangos:

- a) Corta.- < 3
- b) Media.- 3 - 10
- c) Larga.- > 10

Se debe interpretar que a menor distancia entre el sitio del derrame y la ubicación de una falla o fractura, la probabilidad de infiltración del hidrocarburo y por lo tanto de contaminación de los acuíferos, será mayor.

**Tipo de suelo (Permeabilidad).-** Como se sabe la permeabilidad es la capacidad de un suelo de dejar pasar agua. En este caso su importancia radica en la posibilidad de que el hidrocarburo derramado viaje más o menos en dirección horizontal o verticalmente, entendiéndose que será más probable una infiltración del hidrocarburo en sitios con mayor permeabilidad. Tomando en cuenta lo anterior se hizo la siguiente división en subcriterios de permeabilidad:

- a) Alta
- b) Media
- c) Baja

Los valores de permeabilidad de cada sitio fueron obtenidos de los informes técnicos correspondientes y de inferencias hechas considerando el tipo de roca y textura del suelo de cada sitio, reportado en las cartas geológicas (escala, 1: 50,000) de INEGI. Aunque se sabe que la permeabilidad puede ser afectada por varios factores (intrínsecos, propios del suelo, y extrínsecos, de las propiedades de los fluidos que los atraviesan), la textura es uno de los más importantes y en términos generales se establecen relaciones entre el tipo de suelo y la permeabilidad, como el que a mayor tamaño sea el grano (gravas y arenas) mayor será la permeabilidad y a menor (limos arcillas) será menor la permeabilidad (Benítez, 1963, citado en Custodio, 1983 y Casagrande, Fadum, Citado en Juárez, y Rico, 1992).

**Uso del suelo.**- El peso o importancia de este criterio radica en el uso que tiene el suelo en el sitio y los alrededores donde se presentó el derrame y las pérdidas que esto representa. Al considerar lo anterior, se logró hacer la división en subcriterios, los cuales en orden de importancia quedaron de la siguiente forma de acuerdo a la vocación:

- a) Agrícola
- b) Residencial-Comercial
- c) Recreativo
- d) Forestal
- e) Industrial

La información en cuanto a este criterio fue obtenida de estudios existentes de los sitios seleccionados y del Inventario Nacional Forestal Periódico (SEMARNAT, 2000).

**Grupos vulnerables (Edades años).**- Este criterio social se refiere al peligro que representa la existencia de un derrame en una población dada, el cual se debe entender que será mas vulnerable la población representada en su mayoría por niños, ancianos o mujeres que aquella donde la mayor parte sean y hombres

(Calderón, 2001). Los subcriterios resultado de las edades de los que pudieran ser afectados son los siguientes:

- a) Niños.- 0 - 14
- b) Ancianos.- > 65
- c) Mujeres 15 – 64
- d) Hombres 15 – 64
- e) Sin afectación

Los datos para cada sitio (Cuadro II.2.2.), fueron obtenidos del XII Censo General de Población y Vivienda del año 2000. El ultimo criterio que se refiere a sin afectación, se consideró necesario en los casos donde el sitio se encontraba sin población cercana y en lugares donde el paso de las personas era muy remoto.

**Afectación a infraestructura urbana (Servicios).**- Considerando este criterio como la posible afectación que pudiera o no causar un derrame en el sitio, ya sea al sistema de drenaje o de agua potable. Para este caso se vio la necesidad de obtener tres subcriterios en función del servicio al que afectaban y son:

- a) Agua Potable
- b) Drenaje
- c) No

La información correspondiente a este criterio aunque no estaba en todos los casos explícitamente especificada, se infirió al si o no reportarse en los informes técnicos daños en los sistemas de drenaje y agua potable en cada sitio.

**Centros de población más cercanos (Población Total).**- Se debe de entender este criterio como aquellos sitios que se encuentran en o zonas cercanos a centros de población, y que por lógica el daño pudiera ser mayor donde existiera un mayor número de habitantes. Para este caso se definieron 4 subcriterios de acuerdo al número de habitantes y son:

- a) Alta > 1,000,000
- b) Media 100, 000 – 1,000,000



- c) Baja < 100,000
- d) Sin afectación

Los valores del número de habitantes, se obtuvo del XII Censo de población y vivienda del año 2000. Los valores que aparecen en cada sitio en el cuadro II.2.2., son los que corresponden a los centros de población donde se presentó el derrame o el más cercano a él.

**Hidrología Superficial (Tipo).**- Este criterio adquiere su peso en el que estén presentes cuerpos de agua superficial y su distancia al lugar de la fuga o derrame y la probabilidad que existe de ser contaminados, para este caso se hizo una división en dos subcriterios dependiendo del tipo del cuerpo de agua (cuadro II.2.2), y son:

- a) Perennes
- b) Intermitentes

Entendiendo, que aquellos sitios donde se presentaban cuerpos de agua (ríos, arroyos, canales, presas, etc.), con carácter perenne, serían los lugares que deben tener mayor prioridad de atención. Los datos de este criterio se obtuvieron de las cartas topográficas de INEGI, escala 1:250,000. Se consideró la cercanía con presencia o ausencia de estos cuerpos de agua cuando se aplicó solamente la fórmula de "Ratings" y los valores numéricos de distancia se consideraron cuando se llevaron a cabo las pruebas del modelo utilizando adicionalmente otras fórmulas (increasing y decreasing).

**Aguas subterráneas (Uso).**- Para la división de este criterio, se consideró su posible afectación y el que tuvieran uso o no en el sitio donde se presentó el incidente de contaminación. Como resultado de la información obtenida de los informes técnicos, y en algunos casos inferidos de las cartas de aguas subterráneas de INEGI, escala 1:250,000, se logró establecer los siguientes subcriterios del uso o no de las aguas subterráneas:

- a) Sí con uso
- b) Sí sin uso
- c) No

Los subcriterios antes listados se encuentran en el cuadro II.2.2.

**Nivel de Agua freática (N.A.F.) o Nivel Estático (N.E.) (m).**- Se refiere al nivel de agua freática o al nivel estático, al que se encuentra la parte superior del acuífero. En términos generales la probabilidad de ser contaminada será mayor a su proximidad con la superficie. Así sitios con menor N.A.F o N. E., será mayor la probabilidad de ser contaminados que los que están a mayores profundidades. Con lo anterior se pueden obtener los siguientes subcriterios de evaluación en función de la profundidad al que se encuentren los acuíferos:

- a) Mínima.- < 10
- b) Media.- 10 – 20
- c) Máxima.- > 20

Los valores de las profundidades del N.A.F y N.E. fueron obtenidos principalmente de los informes correspondientes a cada sitio y cuando no existía el dato, estos fueron tomados de las cartas de aguas subterráneas de INEGI, escala 1:250,000, considerando el valor reportado en los pozos, que estuvieran más cerca del sitio donde ocurrió el incidente. Los valores numéricos de los NAF y/o NE, se consideraron cuando se llevaron a cabo las pruebas del modelo, utilizando adicionalmente otras fórmulas (Increasing y Decreasing).

**Tipo de vegetación (Daño).**- Este criterio se refiere al tipo de vegetación que existe en o en el entorno de cada lugar donde ocurrió el derrame. Su importancia o peso está relacionado tanto con la productividad primaria neta, así como la mayor o menor diversidad de especies que tiene cada uno de los diferentes ecosistemas vegetales. La división en subcriterios que aquí se reporta es el resultado de la consulta del Inventario Nacional Forestal Periódico del 2000, así como el que se reporta en la literatura especializada (Challenger, 1998). Al considerar lo anterior,

la división en subcriterios de evaluación de acuerdo al tipo de vegetación que pudiera ser afectada queda como sigue:

- a) Selvas
- b) Bosques
- c) Pastizal
- d) Pantanos
- e) Matorral
- f) Vegetación Cultivo
- g) Vegetación Urbana

La división anterior se logra, al distinguir la importancia ecológica de cada tipo de vegetación, así los ecosistemas de selvas son las que se consideran como las de mayor productividad primaria neta (Whittaker, 1975, citado en Krebs, 1985) y las de mayor diversidad de especies (Rzedowski, 1993, citado en Challenger, 1998) y los menos productivos biológicamente y con una densidad muy baja son los de matorral o vegetación desértica o semidesértica. La vegetación de cultivo y urbana para este caso se consideran desde el punto de vista ecológico las más pobres.

**Afectación a Áreas Naturales Protegidas (ANP).**- Se refiere el posible daño que significaría el que un derrame se diera en estas zonas, consideradas muy importantes desde el punto de vista ecológico. Para este criterio en función de si son o no afectadas, se dan dos subcriterios:

- a) Sí.- Cuando el derrame se presenta dentro de una ANP
  - b) No.- En los casos en los que el derrame se presenta fuera de una ANP
- Para la obtención de esta información, se utilizaron las cartas topográficas 1:250,000 de INEGI segunda edición en formato digital, información que fue complementada mediante la ubicación de las ANP, que aparecen reportadas en la figura 3 (Melo, 2002), en la cual aparece la ubicación geopolítica de las diferentes Áreas Naturales Protegidas de la República Mexicana, así como con la ubicación geográfica que reporta la SEMARNAT en los mapas de las ANP por estados, en su biblioteca digital geográfica, que aparece en su página de Internet.

[http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/4696/\\_s.155/4691](http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/4696/_s.155/4691)

**Vías de comunicación.-** Se refiere a posibles afectaciones a las vías de comunicación que pudieran ser provocadas por los derrames. Este criterio fue dividido solamente en dos subcriterios de acuerdo a si afectó o no y son:

- a) Sí.- El derrame afectó vías de comunicación
- c) No.- El derrame no afectó vías de comunicación

La afectación o no a las vías de comunicación fue obtenida de los informes técnicos y en los casos donde no existe, ésta fue inferida por la ubicación del derrame en el área.

**Pendientes del terreno (%).**- Su importancia radica en el grado de inclinación del terreno donde ocurrió el derrame, para este caso, se consideró en principio una división de los siguientes subcriterios basados en el grado de inclinación:

- a) Suave.- < 10%
- b) Media.- 10 – 15%
- c) Moderada.- 15 – 30%
- d) Fuerte.- 30 – 45%
- e) Abrupta.- > 45%

Los rangos de la pendiente del terreno, se realizaron considerando las divisiones hechas por algunos autores como Lugo, 1988; y los valores de cada sitio fueron obtenidos mediante el modelo digital de pendientes realizado en el laboratorio SIG y PR del Instituto de Geografía de la UNAM. Como se aprecia en el cuadro II.2.2., los valores de pendiente de los diferentes sitios quedaron dentro de la clasificación de suave (< a 10%), por lo que este criterio no dio ningún peso diferencial dentro del análisis de jerarquización. En este caso también fueron utilizados en forma directa los valores numéricos obtenidos de las pendientes en cada sitio, cuando se variaron las fórmulas del modelo en las diferentes pruebas realizadas del mismo.

Cuadro II.2.2. Criterios seleccionados, subdivisiones (subcriterios) y valores nominales. Fuente: Elaborado por el autor

Sitios	Tipo de contaminante	PP Media anual (mm)	Temp. Media anual (°C)	Fallas o Fracturas (Distancia en km)	Tipo de Suelo Material (Permeabilidad)	Uso del Suelo	Grupos Vulnerables	Afectación a infra Urbana
1	gasolina-diesel	616.2 (M)	27.8 (M)	11.75 (L)	Tobas Arenoso-arcillosa (B)	Industrial	Mujeres	Agua potable
2	Turbosina	796.8 (A)	28.9 (M)	7.5 (M)	Arcillo-arenoso (B)	Industrial	Niños	Agua potable
3	Gasolina M	1047.9 (A)	31.3 (A)	1.25 (C)	Arcillo-arenoso (B)	Industrial	Niños	No
4	Mezcla	608.1 (M)	28.1 (M)	13.75 (L)	Areno limosos (B)	Industrial	Mujeres	No
5	Diesel-gasolina	910.6 (A)	30.8 (A)	2.5 (C)	Areno-arcillosa (M)	Residencial-Comercial	Niños	No
6	Diesel-gasolina	1195.9 (A)	33.7* (A)	8.5 (M)	Arcillo-limoso (B)	Industrial	Sin afectación	No
7	mezcla	889.8 (A)	29.2 (M)	10.25 (L)	areno-arcilloso lapilli (M)	Industrial	Mujeres	Drenaje
8	Gasolina - Diesel	86.2 (B)	30.8 (A)	17.75 (L)	Limo-arcillo arenoso (B)	Industrial	Niños	No
9	Gasolina-N	570.8 (M)	26.5 (M)	42.25 (L)	Limo-arenoso (B)	Agrícola	Niños	No
10	Gasolina-M	704.9 (A)	25.8 (B)	6.25 (M)	Arcillo-limo-arenoso (B)	Residencial-Comercial	Mujeres	No
11	Diesel - Gasolina	501.3 (M)	25 (B)	7.25 (M)	Arcillo-arenoso (B)	Industrial	Mujeres	No
12	Diesel - Gasolina	1384.4 (A)	25.6 (B)	8 (M)	Arcillo-arenoso (B)	Agrícola	Niños	No
13	Diesel - mezcla pesados	704.9 (A)	25.8 (B)	6.25 (M)	Arcillo-limo-arenoso (B)	Industrial	Mujeres	No
14	Mezcla	3155 (A)	28 (M)	32.25 (L)	Limo-arenoso (B)	Industrial	Mujeres	No
15	Turbosina	954.5 (A)	26 (M)	86.5 (L)	Areno-arcillosa Lacustre (M)	Industrial	Niños	No
16	Diesel - Gasolina	1101.5 (A)	34.5 (A)	3.75 (M)	Areno-arcillosa (M)	Industrial	Mujeres	No
17	Gasolina-M	566.3 (M)	24.0* (B)	6.75 (M)	Arcillo-limoso (B)	Agrícola	Niños	No
18	Gasolina	711.5 (A)	23.5 (B)	3.75 (M)	Areno arcilla (M-A)	Agrícola	Niños	No
19	Gasolina M Diesel	696 (M)	31.7* (A)	4.75 (M)	Arcillo arenosa (B)	Agrícola	Niños	No
20	No	680.5 (M)	28.3 (M)	3.75 (M)	Arcillo Arenoso R And (B)	Industrial	Mujeres	No
21	No	403.7 (M)	22 (B)	2.9 (C)	Arcillo - Arenosa (B)	Industrial	Mujeres	No
22	Diesel	1933.7 (A)	31.3 (A)	26 (L)	Arcillo - Arenosa (B)	Agrícola	Niños	No
23	Combustóleo	773.6 (A)	29.8* (M)	2.9 (C)	Arcillo arenosa (B)	Industrial	Sin afectación	No
24	Crudo	570.8 (M)	26.5 (M)	17 (L)	Arcillo-arenosa (B)	Agrícola	Niños	No
25	Mezcla	166.7 (B)	30 (M)	8.5 (M)	Arcillo - Arenosa (B)	Industrial	Hombres	No
26	Mezcla	271.9 (B)	31.6 (A)	1 (C)	Areno-arcillosa (M)	Industrial	Niños	No
27	Mezcla	352.8 (M)	23.7 (B)	8 (M)	Arcillo-arenosa (B)	Industrial	Mujeres	No
28	Diesel- Gasolina	237.6 (B)	30.8 (A)	15.5 (L)	Limo-Arenosa (B - M)	Agrícola	Sin afectación	No
29	Diesel- Gasolina	368.4 (M)	26.8 (M)	9.25 (M)	Arcillo - Arenosa (B)	Agrícola	Sin afectación	No
30	Diesel- Gasolina	255.9 (B)	30.9 (A)	37.25 (L)	Arcillo - Arenosa (B)	Agrícola	Sin afectación	No

a) Gasavión  
b) Gasolina  
c) Gasolina-diesel-gasolina  
d) Turbosina  
e) Diesel  
f) Crudo  
g) Combustóleo  
h) Mezcla

a) A = Alta > 700  
b) M = Media 300 - 700  
c) B = Baja < 300

a) A = Alta > 30  
b) M = Media 26 - 30  
c) B = Baja < 26

a) C = Distancia Corta < 3  
b) M = Distancia Media 3 - 10  
c) L = Distancia Larga > 10

a) A = Alta  
b) M = Media  
c) B = Baja

a) Agrícola  
b) Residencial-Comercial  
c) Recreativo  
d) Forestal  
e) Industrial

a) Niños 0 - 14 años  
b) Ancianos > 65 años  
c) Mujeres 15 - 64 años  
d) Hombres 15 - 64 años  
e) Sin afectación

a) Agua potable  
b) Drenaje  
c) No

Continuación... del Cuadro II.2.2. Criterios seleccionados, subdivisiones (subcriterios) y valores nominales. Fuente: Elaborado por el autor

Sitios	Centros de población más cercano (Total de habitantes)	Hidrología superficial (Km)	Aguas subterráneas	N.A.F. o N.E. (m)	Tipo de vegetación	Afectación a ANP	Vías de Comunicación	Pendiente del terreno %
1	226.654 (M)	0.850 (P)	Si Con uso	12.99 (Me)	V Urbana	No	No	0 (Su)
2	69.205 (B)	0.068 (P)	Si Con uso	9.50 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
3	37.989 (B)	1.527 (I)	Si Con uso	7.00 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
4	670.162 (M)	0.500 (P)	Si Sin uso	14.50 (Me)	V Urbana	No	No	0 (Su)
5	84.405 (B)	1.720 (P)	Si Con uso	15.00 (Me)	V Urbana	No	No	4.44 (Su)
6	Sin afectación	1.550 (P)	Si Sin uso	2.90 (Mi)	V Urbana	No	No	2.22 (Su)
7	1.646.319 (A)	0.870 (I)	Si Sin uso	6.50 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
8	764.602 (M)	5.600 (I)	Si Sin uso	9.00 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
9	64.315 (B)	1.150 (I)	Si Sin uso	40.00 (Ma)	V Cultivo	No	No	2.22 (Su)
10	8.605.239 (A)	4.890 (I)	Si Sin uso	3.20 (Mi)	V Urbana	No	Si	0 (Su)
11	420.463 (M)	0.140 (I)	Si Sin uso	1.00 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
12	89.382 (B)	2.374 (P)	Si Sin uso	3.00 (Mi)	V Cultivo	No	No	0 (Su)
13	8.605.239 (A)	4.800 (I)	Si Sin uso	3.20 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
14	153.001 (M)	0.324 (P)	Si Sin Uso	2.00 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
15	48.797 (B)	2.699 (P)	Si Sin Uso	0.85 (Mi)	V Cultivo	No	No	0 (Su)
16	216.897 (M)	0.614 (P)	Si Sin Uso	18.00 (Me)	V Urbana	No	No	0 (Su)
17	61.250 (B)	0.625 (I)	No	10.00 (Me)	V Cultivo	No	No	2.22 (Su)
18	68.336 (B)	2.970 (I)	Si Con uso	18.00 (Me)	V Cultivo	No	No	4.44 (Su)
19	21.044 (B)	0.575 (I)	No	180.00 (Ma)	Pastizal	No	No	6.67 (Su)
20	256.130 (M)	1.195 (I)	No	7.80 (Mi)	V Urbana	No	No	2.22 (Su)
21	245.208 (M)	2.140 (I)	No	60.00 (Ma)	V Urbana	No	No	0 (Su)
22	158.573 (M)	3.040 (P)	No	7.00 (Mi)	V Cultivo	No	No	0 (Su)
23	Sin afectación	0.481 (P)	No	6.00 (Mi)	V Urbana	No	No	0 (Su)
24	40.439 (B)	1.924 (I)	No	16.00 (Me)	V Cultivo	No	Si	2.22 (Su)
25	196.907 (M)	2.500 (I)	No	41.5 (Ma)	V Urbana	No	No	0 (Su)
26	130.329 (M)	2.280 (P)	No	18.00 (Me)	V Urbana	No	No	2.22 (Su)
27	670.532 (M)	1.450 (I)	No	120.00 (Ma)	V Urbana	No	No	0 (Su)
28	Sin afectación	0.200 (I)	Si Sin Uso	2.50 (Mi)	V Cultivo	No	No	0 (Su)
29	Sin afectación	9.200 (I)	No	50.50 (Ma)	Matorral Des.	No	No	0 (Su)
30	Sin afectación	1.100 (I)	No	79.00 (Ma)	Matorral Des.	No	No	0 (Su)

a) A = Alta > 1.000.000  
 b) M = Media 1.000.000 - 100.000  
 c) B = Baja < 100.000  
 d) Sin afectación

a) P = Perene  
 b) I = Intermitente

a) Si Con uso  
 b) Si Sin uso  
 c) No

a) Mi = Prof. Mínima < 10  
 b) Me = Prof. Media 10 - 20  
 c) Ma = Prof. Máxima > 20

a) Selvas  
 b) Bosques  
 c) Pastizal  
 d) Matorral  
 e) V. Cultivo  
 f) V. Urbana

Si  
 No

Si  
 No

Su = Suave = < 10%  
 Me = Media = 10 - 15%  
 Mo = Moderada = 15 - 30%  
 Fu = Fuerte = 30 - 45%  
 Ab = Abrupta = > 45%

## Cuadro II.2.3. Relación de cartas temáticas utilizadas como complemento a la información de los sitios seleccionados.

Fuente: Elaborado por el autor

	Nombre	Localidad	Clave Carta escala 1:250000	Nombre de la Carta	Año de edición (Topo)	Año de Impresión (Topo)	Año de edición (Geolo)	Año de Impresión (Geolo)	Año de edición (Subterra)	Año de Impresión (Subterra)
1	Ing. Antonio M. Amor	Salamanca, Gto.	F 14 - 10	Querétaro	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1998	1 - 1999	1 - 1981 (***)	-----
2	Est. Reb-5	Linares, NL	G 14 - 11	Linares	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983 (***)	1 - 1983	1 - 1983 (***)	-----
3	Arriaga	Arriaga, Chis.	E 15 - 11	Tuxtla Gutiérrez	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1985	1 - 1985	1 - 1988	1 - 1988
4	San Rafael	Gpe. Nvo. León	G 14 - 7	Monterrey	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1988	1 - 1988	1 - 1981 (***)	-----
5	Gasolinera 452	Yautepec, Mor.	E 14 - 5	Cuernavaca	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1984	1 - 1985	-----
6	Poli. Ref.-Term. Marítima	Salina Cruz, Oax.	E 15 - 10	Salina Cruz	2 - 1996	1 - 1998	1 - 1988	1 - 1988	1 - 1988	1 - 1988
7	La Nogalera	Guadalajara, Jal.	F 13 - 12	Guadalajara	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1988	1 - 1988	2 - 1999	1 - 2000
8	Mexicali	Mexicali, BCN.	I 11 - 12	Mexicali	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983 (***)	1 - 1983	1 - 1981 (***)	-----
9	Poli. Minatitlán - México	Amozoc, Pue.	E 14 - 2	Ciudad de México	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1983	1 - 1983	-----
10	Gasolinera 3002	México, D.F.	E 14 - 2	Ciudad de México	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1983	1 - 1983	-----
11	Reynosa	Reynosa, Tam.	G 14 - 5	Reynosa	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983 (***)	1 - 1983	1 - 1983 (***)	-----
12	Poli. N. Teapa-Venta Carpio	Tierra Blanca, Ver.	E 14 - 6	Orizaba	2 - 1998	1 - 1998	1 - 1983	2 - 1994	1 - 1983	-----
13	18 de Marzo	México, D.F.	E 14 - 2	Ciudad de México	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1983	1 - 1983	-----
14	Gral. Lázaro Cárdenas	Minatitlán, Ver.	E 15 - 7	Minatitlán	2 - 1998	1 - 1998	1 - 1984	1 - 1984	1 - 1988	1 - 1988
15	Progreso	Progreso, Yuc.	F 16 - 7	Tizimin	2 - 1996	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1984	1 - 1983	-----
16	Lerma	Lerma, Camp.	E 15 - 3	Campeche	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1984	1 - 1985	-----
17	Poli. La Cima - Azcapotzalco	Acolman, Mex.	E 14 - 2	Ciudad de México	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1983	1 - 1983	-----
18	Poli. Tula - Toluca	Jilotepec, Edo. Méx.	F 14 - 11	Pachuca	2 - 1998	1 - 1998	1 - 1983 (***)	1 - 1983	1 - 1983 (***)	-----
19	Polid. Salamanca Guadalajara	Degollado, Jal.	F 13 - 12	Guadalajara	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1988	1 - 1988	2 - 1999	1 - 2000
20	Oaxaca	Oaxaca, Oax.	E 14 - 9	Oaxaca	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1984	1 - 1984	1 - 1988	1 - 1988
21	Pachuca	Pachuca, Hgo.	F 14 - 11	Pachuca	2 - 1998	1 - 1998	1 - 1983 (***)	1 - 1983	1 - 1983 (***)	-----
22	Polid. Minatitlán Villa Hermosa	Benito Juárez Huemanguillo, Tab.	E 15 - 8	Villahermosa	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983 (***)	1 - 1983	1 - 1983 (***)	-----
23	Combustoleoducto Esperanza-CFE	Mazatlán, Sin.	F 13 - 1	Mazatlán	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1983	1 - 1983	1 - 1983	-----
24	Oleod. Nvo. Teapa - V. Carpio	Acatzingo, Pue.	E 14 - 6	Orizaba	2 - 1998	1 - 1998	1 - 1983	2 - 1994	1 - 1983	-----
25	La Paz	La Paz, B.C.S.	G 12 - 10	La Paz	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1984	9 - 1999	1 - 1984	-----
26	Guaymas	Guaymas, Son.	G 12 - 2	Guaymas	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1982 (***)	1 - 1982	1 - 1983 (***)	-----
27	San Luis Potosí	San Luis Potosí	F 14 - 4	San Luis Potosí	2 - 1996	1 - 1998	1 - 1982 (***)	1 - 1982	1 - 1979 (***)	-----
28	Válvula de Secc. Bolívar	El Dorado, Coahuila	G 13 - 9	Torreón	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1988	3 - 1999	1 - 1981	-----
29	Válvula de Secc. Conejos	Cd. Jiménez, Chihuahua	G 13 - 6	Tlahualilo de Zaragoza	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1988	1 - 1988	1 - 1981	-----
30	Válvula de Secc. Ceballos	Ceballos, Durango	G 13 - 5	Hidalgo del Parral	2 - 1997	1 - 1998	1 - 1988	1 - 1988	1 - 1991	1 - 1992

Notas: En las celdas de año de edición y de impresión, aparecen dos números separados por un guión, el primero se refiere a la edición o impresión y el segundo corresponde al año. Los tres asteriscos entre parentesis que aparecen en las columnas de "Geolo" (Geológicas) y Subterra (A. Subterráneas) indica que fueron editadas por La Coordinación General de los Servicios de Estadística, Geografía e Informática de la Dirección de Geografía del Territorio Nacional. Las demás por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

**b) Descripción y aplicación del procedimiento de jerarquización.**

El método de toma de decisiones multicriterio (MCDM), ha sido probado, dando excelentes resultados (Thill, 1999 y Malczewski, 1999). En la presente tesis se pretende utilizar esta técnica y aplicarla de forma sistemática, como parte del procedimiento de jerarquización y con esto la priorización para la atención de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos. Un ejemplo que demuestra la factibilidad de poder aplicar este tipo de técnicas a problemas ambientales, que por supuesto incluyen para la solución, el tomar en cuenta varios criterios, se trata de un estudio realizado por Marrero, M. M. y Petersson R. M., 2001, relacionado con la contaminación del agua potable y los efectos económicos que esto implica.

Ahora bien, para llevar a cabo el procedimiento de priorización de sitios con suelos contaminados, la cual implica el análisis mediante el método de multicriterio con la identificación y selección de varios criterios y subcriterios (ambientales y sociales). También resultó de gran utilidad la aplicación como herramienta del procedimiento la técnica Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) o (Analytic Hierarchy Process) AHP, desarrollada por Thomas, L. Saaty.

Saaty demostró matemáticamente el poder de este método para la obtención de pesos relativos, a partir de una matriz de decisión o de comparación de pares de criterios y subcriterios o atributos, dando como resultado una ordenación de alternativas o priorización.

El fundamento de esta técnica, descansa en el hecho, que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir, la forma en la cual contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende.

El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos, en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión. Se cree que este es el



método natural (pero refinado) que las personas siguieron al tomar decisiones mucho antes que se implementaran funciones de utilidad y antes que se desarrollara formalmente el AHP, la teoría refleja que parece ser un método innato de la operación de la mente humana (Thomas Saaty, 1998, citado en Avila M. R., 2000 y Saaty, 1980).

Este proceso, implica la descomposición en criterios y subcriterios, que para este caso fueron tanto ambientales como sociales, así como la identificación de las alternativas como son los sitios contaminados (Cuadro II.2.2.). Esta información se ordenó en parejas, realizando comparaciones binarias (de pares) para obtener sus pesos relativos. Esta técnica tiene la ventaja de permitir comparar criterios cualitativos y cuantitativos, por medio de juicios con fundamentos, con lo que se obtienen los pesos, lo que se traduce en prioridades (Avila, 2000).

Se considera importante comentar, que los criterios y subcriterios antes identificados y seleccionados son el resultado y aportación del autor con base en su propia investigación, la cual consideró la opinión y puntos de vista de diversos especialistas. Sin embargo, estos criterios y subcriterios no son únicos y podrían ser perfectibles.

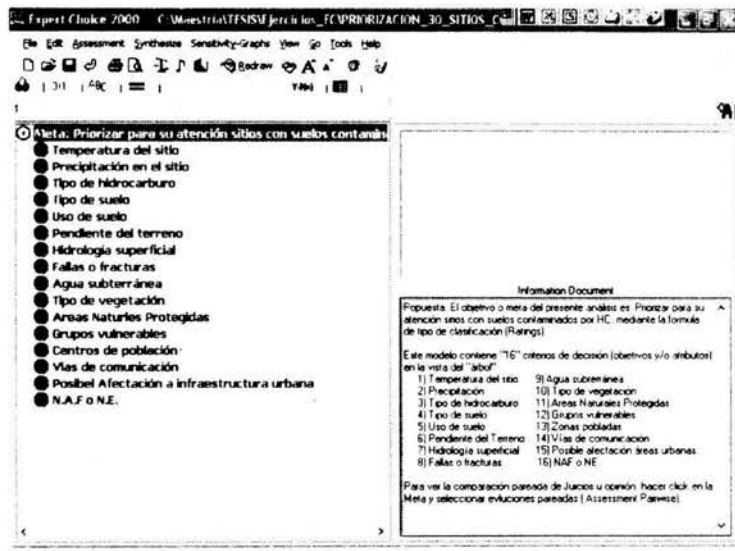
Otra aspecto que cabe mencionar, es que la opinión de una única persona en la toma de decisión puede ser insuficiente, poco objetiva o de baja representatividad, cuando se analizan problemas complejos, sobre todo aquellos cuya solución puede afectar a muchas otras personas. Por lo que el presente análisis se llevó a cabo considerando la opinión de varios expertos en las disciplinas que se encuentren involucradas en el problema y que por su experiencia y conocimiento, pudieron ayudar tanto en la estructuración del problema, así como en la evaluación de las posibles alternativas (jerarquización de sitios contaminados).

**c) Creación del modelo**

A continuación se describe como fue creado y diseñado el modelo, considerando el tipo y la naturaleza de la información existente de los 30 sitios seleccionados con suelos contaminados por hidrocarburos. La construcción del modelo se realizó dentro del ambiente del programa computacional Expert Choice, que funciona con base a la teoría desarrollada por Saaty, para efectos de este estudio esta parte se realizó en tres pasos, que a continuación se detallan.

El primer paso dentro de un análisis de jerarquización es el de identificar claramente un objetivo o meta, que ocupará la parte más alta dentro de un arreglo tipo árbol (jerarquía), debajo de este, estarán los criterios (16) y subcriterios, cada nivel del árbol también es referido como un “nodo”. La figura II.2.1, muestra el arreglo antes comentado

Figura II.2.1. Arreglo en jerarquía: Meta y Criterios de decisión.



además de dar una breve descripción de cada criterio y su subdivisión en subcriterios, información que aparece en el cuadro inferior derecho de la figura.

Al listar todos los criterios, se debe poner una explicación clara y concisa de cada uno de ellos que se utilizarán para el análisis, esto es importante para que los participantes tengan la idea de cada uno de los criterios y no se presente confusión y con esto puedan otorgar los pesos de importancia que consideren adecuados para cada uno de los criterios involucrados.

Es importante mencionar que para este caso, no se usa el término de objetivo como lo indica la técnica, sino el de criterio, ya que se trata de ciertas características (criterios) que tienen los diferentes sitios contaminados y no el deseo que tengan o no esas características (objetivos).

Ya establecidos la meta y los criterios de decisión, el segundo paso es el de incluir las alternativas (en la matriz de datos o de decisión), que para el presente estudio corresponde a los diferentes sitios con problemas de contaminación. Para probar el modelo se trabajará con 30 sitios que han sido previamente seleccionados.

Para llevar a cabo el análisis, se aplicará una matriz de datos (Data Grid) o también llamada matriz de decisión y se utilizará en primer instancia la fórmula o algoritmo llamado de "Ratings" o clasificar, misma que se basa en un rango de escala. Esta matriz contiene los datos acerca de las

Figura II.2.2. Matriz de decisión con sus Alternativas y Criterios.

Ideal mode	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RA
Alternative	Total	Temperatura del sitio	Precipitación en el sitio	Tipo de hidrocarburo	Tipo de suelo	Uso de suelo	Pendiente del terreno	Hidro sup
Refinería	.000							
Est. Reb. S Linares	.000							
TAD Arriaga, Chis.	.000							
TAD San Rafael	.000							
Gasolinera 452	.000							
Polid.	.000							
TAD La Nogalera	.000							
TAD Mexicalt.	.000							
Polid.	.000							
Gasolinera 3002	.000							
CPG, Reynosa	.000							
Polid. Nvo. Teapa-V.	.000							
Ex-TAD 18 de	.000							
Refinería	.000							
TAD Progreso, Yuc.	.000							
TAD Lerma, Camp.	.000							
Polid. La	.000							

alternativas de decisión con respecto a la jerarquía de decisión de los criterios de evaluación. En este caso las alternativas aparecen en los renglones y los criterios en las columnas, ver líneas punteadas, como se ilustra en la Figura II.2.2.

En este modelo, las alternativas (sitios contaminados), son adicionadas desde la matriz de datos y se les denomina como alternativas globales, ya que no se realizan comparaciones binarias entre ellas, puesto que su priorización se realizará mediante los pesos totales que contenga cada sitio con base a los criterios y subcriterios que les correspondan.

Este tipo de análisis, se basa en una matriz de decisión, en la que en los renglones aparecen las alternativas y en las columnas los criterios y subcriterios de decisión, donde estos dos últimos serán evaluados mediante análisis de pares

Figura II.2.3 Matriz de decisión con los totales (suma de los pesos de los criterios y subcriterios) marcando las prioridades de las alternativas.

Alternativa	Total	RATINGS Temperatura del sitio	RATINGS Precipitación en el sitio	RATINGS Tipo de hidrocarburo	RATINGS Tipo de suelo	RATINGS Uso de suelo	RATINGS Pendiente del terreno	RA supr
Refinería	000							
Fed. Ries. 5 lineares	000							
TAD Artaqa. Chis.	000							
TAD San Rafael	000							
Gasolinera 452	000							
Holid	000							
TAD La Nogalera	000							
TAD Mexicall.	000							
Holid	000							
Gasolinera 3002.	000							
CPG. Reynosa.	000							
Holid Nvo Lempa V	000							
Ex TAD 18 de	000							
Refinería	000							
TAD Yagrosa, Yuc	000							
TAD Lerma. Camp	000							
Holid La	000							

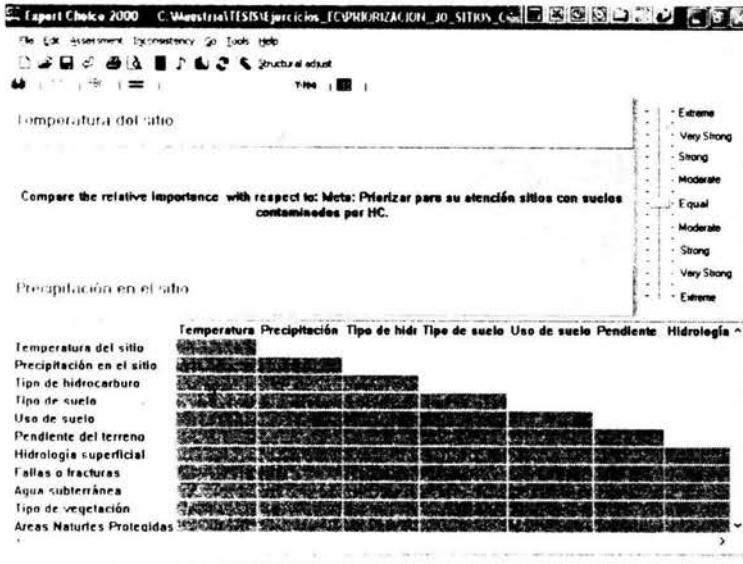
de criterios y subcriterios, obteniendo pesos diferenciales con base a cálculos matriciales, que se reflejarán en valores totales, segunda columna de la figura II.2.3, (línea punteada), la cual dará el lugar en la jerarquización y por lo tanto el valor de priorización a cada uno de los sitios contaminados.

Este tipo de análisis es la mejor selección, sobre todo, cuando se trabaja con un número muy grande de alternativas, tomando en cuenta el número de comparaciones que se requieren hacer  $(n*(n-1)/2)$ , si en esta prueba se utilizan 30 sitios el número de comparaciones entre alternativas ascendería a 435 comparaciones, haciendo el trabajo muy tedioso y pesado. Por lo que el uso de la matriz de datos (Data Grid), combina el poder de la jerarquía y el proceso de comparación pareadas (pairwise) con la habilidad para evaluar cientos y hasta miles de alternativas, que pudiera ser el caso de los sitios contaminados (cientos).

Las prioridades de las alternativas son establecidas, basándose en las comparaciones binarias y los valores obtenidos de los criterios y subcriterios, por medio de la aplicación de una fórmula que se basa en una clasificación o "Ratings" escalada de radio de intensidades. Esta formula es comúnmente aplicada en los casos de aspectos subjetivos de evaluación o cuando no existen datos duros o reales.

Una vez creado el modelo, el tercer paso consistió en la evaluación de los pesos de los elementos, haciendo comparaciones binarias o pareadas entre criterio y criterio o subcriterio y subcriterio. Una comparación pareada es el proceso de

Figura II.2.4. Comparación pareada (Pairwise) para la obtención de la importancia relativa de cada criterio de evaluación.



comparar la importancia relativa, preferencia o probabilidad de dos elementos (criterios o subcriterios) con respecto a otro elemento que se encuentra en lo más alto del arreglo jerárquico y que en este caso corresponde a la meta, estas comparaciones tiene como objeto principal el establecimiento de

prioridades. Para el presente caso, se llevarán a cabo comparaciones de importancia relativa (Figura II.2.4).

Existen tres modos para llevar a cabo la evaluación de las comparaciones pareadas o juiciosas: juicios verbales; juicios gráficos y juicios numéricos, aquí se usarán los primeros o sea los juicios verbales, en los cuales se comparan factores usando palabras como: igual, moderada, fuerte, muy fuerte, extrema. Para el caso de "igual" no se requiere explicar su valor es 1, "extrema" adquiere el valor más alto que es de 9 y desciende hasta llegar al igual pasando por los términos antes mencionados y sus intermedios (Cuadro II.2.4). Se debe utilizar la palabra que más verazmente represente el sentir del que esta llevando a cabo la comparación.

**Cuadro II.2.4.- Representaciones numéricas de los juicios verbales.**

Extrema	9
Muy fuerte a Extrema	8
Muy fuerte	7
Fuerte a Muy fuerte	6
Fuerte	5
Moderada a Fuerte	4
Moderada	3
Igual a Moderada	2
Igual	1

La forma de llevar a cabo las evaluaciones de las comparaciones juiciosas o pareadas se pueden hacer de dos formas, una es la llamada de abajo hacia arriba (Botton-Up) y la otra es de arriba hacia abajo (Top-Down). Para la prueba del modelo que se presenta en esta tesis, se hará de arriba hacia abajo, ya que lo que se busca es priorizar para su atención a los sitios contaminados que en este caso corresponden a las alternativas.

Otra de las ventajas que tiene esta técnica, es la de identificar posibles errores en las evaluaciones pareadas o juicios. Esta es la inconsistencia, que mide las inconsistencias lógicas de los juicios o comparaciones realizadas, por ejemplo de orden: si se dijo que  $A > B > C$  y después se afirma que  $C > A$  entonces la última aseveración no es consistente. También algunas veces refleja inconsistencias de órdenes de magnitud. Un radio de consistencia de 0.10 o menos es considerado aceptable (Saaty, 1980).

Todos los pasos de la técnica antes discutida, se basaron tomando en cuenta los fundamentos planteados en la teoría de Saaty (AHP), en la creación del modelo se seleccionaron y usaron algunos de los algoritmos y fórmulas incluidos en el programa (software) Expert Choice, de la misma manera que pudo haberse utilizado cualquier otro software, que cumpliera con los requerimientos necesarios para llevar a cabo este análisis. Sin embargo, el programa antes mencionado fue elaborado tomando como base la teoría creada por Saaty, por lo que fue seleccionado para formar parte del procedimiento de jerarquización.

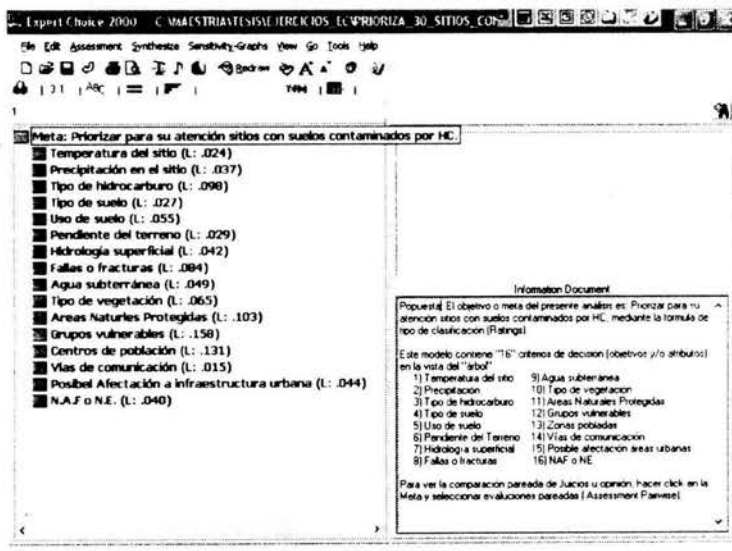
En los párrafos anteriores, se han indicado las partes que conforman al procedimiento de priorización para la atención de sitios contaminados y que esta basado en un análisis de multicriterio, también se describió una de las herramientas más útiles para resolver este tipo de problemas como lo es la técnica AHP. A continuación se describirá el funcionamiento del procedimiento y del modelo construido para dar la priorización de los sitios seleccionados. En esta etapa se incluyen algunas variaciones en cuanto al uso de diversas fórmulas en el modelo, con el objeto de seleccionar el mejor que se adapte o funcione para el fin que fue creado, además de probar su efectividad y buen funcionamiento independientemente del grupo de especialistas que participe en la evaluación. A continuación se detallan las etapas a seguir:

- Como primera etapa ya teniendo los criterios seleccionados, estos se llevaron a un análisis de comparaciones binarias (Pairwise), con el objeto de obtener sus pesos de importancias relativas con respecto a la meta del presente estudio.

En la figura II.2.5, se muestra como aparecen los criterios ya con sus valores de importancia relativa que se les asignó (a la derecha).

Aquí en este punto es muy importante que se tenga clara la definición de cada uno de los criterios involucrados en el análisis, para evitar confusiones a la hora de asignar los pesos de importancia relativa a cada criterio por los especialistas participantes.

Figura II.2.5. Criterios de evaluación seleccionados con sus valores de importancia relativa.



- El segunda etapa fue la de incluir los 30 sitios seleccionados para probar el procedimiento y que para la técnica se refiere a las alternativas globales. Estos se agregan en la matriz de datos (Data Grid). Ya en la matriz, aparecen los criterios o atributos con sus respectivos pesos en las columnas y los sitios que se acaban de agregar en los renglones.

- La tercera etapa, referida a una segunda evaluación, la cual consiste en otorgarle pesos de importancia relativa a los subcriterios o subdivisiones de cada criterio, además de escoger qué fórmula se le aplicará a cada subcriterio, lo cual dependerá de la naturaleza de la información del subcriterio que se trate, ya sea numérico o no numérico (cuantitativo o cualitativo). Es importante mencionar que cuando el criterio es numérico y existen datos reales (duros), se puede optar por establecer rangos de un conjunto de datos o ser utilizados directamente mediante funciones de normalización de estos y utilización de fórmulas *ex profeso* para tratar este tipo de información.

Figura II.2.6. Matriz de datos o de decisión con los resultados de priorización de sitios contaminados.

Alta	Media	Baja							
1 (1.000)	2 (.335)	3 (.149)							
Idéal mode	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RA	
Alternative	Total	Temperatura del sitio [L: .024]	Precipitación en el sitio [L: .037]	Tipo de hidrocarburo [L: .096]	Tipo de suelo [L: .027]	Uso de suelo [L: .059]	Pendiente del terreno [L: .029]	Hidr. sup. [L: .]	
05. Gasolinera	.559	Alta	Alta	ina-diesel-ga	Media	dencial-comc	Suave	Pe	
03. TAD Arlaque	.548	Alta	Alta	Gasolina	Baja	Industrial	Suave	Inter	
18. Polid.	.522	Baja	Alta	Gasolina	Alta	Agícola	Suave	Inter	
02. Est. Reb. 5	.511	Media	Alta	Turbosina	Baja	Industrial	Suave	Pe	
12. Polid.	.497	Baja	Alta	ina-diesel-ga	Baja	Agícola	Suave	Pe	
22. Polid.	.494	Alta	Alta	Diesel	Baja	Agícola	Suave	Pe	
10. Gasolinera	.484	Baja	Alta	Gasolina	Baja	dencial-comc	Suave	Inter	
26. TAD Guaymas	.453	Alta	Baja	Mezcla	Media	Industrial	Suave	Pe	
15. TAD Progreso	.448	Media	Alta	Turbosina	Media	Industrial	Suave	Pe	
17. Polid. La	.436	Baja	Media	Gasolina	Baja	Agícola	Suave	Inter	
09. Polid.	.424	Media	Media	Gasolina	Baja	Agícola	Suave	Inter	
19. Polid.	.421	Alta	Media	ina-diesel-ga	Baja	Agícola	Suave	Inter	
08. TAD Medcall.	.411	Alta	Baja	ina-diesel-ga	Baja	Industrial	Suave	Inter	
13. Ex-TAD 18 de	.398	Baja	Alta	Mezcla	Baja	Industrial	Suave	Inter	
07. TAD La	.387	Media	Alta	Mezcla	Media	Industrial	Suave	Inter	
01. Refinería	.386	Media	Media	ina-diesel-ga	Baja	Industrial	Suave	Pe	

En la figura II.2.6, aparece la matriz de decisión, en el cual se observan por un lado las fórmulas utilizadas que fueron las de "Ratings", que son recomendadas cuando no existen datos duros, en las que se definen escalas de intensidades para dar prioridades. También, muestra los resultados del análisis que culminan en el producto final,



que es la priorización, esta se observa en la columna de total, en la que aparecen los valores que les correspondieron a cada sitio, lo que representa el lugar en la jerarquía de atención.

En el cuadro II.2.5, se muestran los resultados completos del análisis de priorización para la atención a sitios con suelos contaminados por hidrocarburos y donde se evidencia, cuales sitios tienen más prioridad que otros, esto por los valores de priorización más altos obtenidos con base a las sumatorias de los productos entre los criterios y subcriterios de evaluación que le correspondieron a cada sitio evaluado.

Los resultados obtenidos con el procedimiento elaborado, permitieron realizar la priorización para la atención de sitios contaminados, donde efectivamente se logró confirmar cuales sitios debieron haberse atendido primero, considerando que se tenían antecedentes de 24 sitios de los 30 analizados, lo que hace constatar estos resultados.

El procedimiento de priorización, se probó con tres sitios imaginarios (Sitio 10, Sitio 20 y Sitio 30), a los que se les asignaron valores extremos e intermedios a cada uno de los 16 criterios ambientales y sociales seleccionados, esto se llevo a cabo con el objeto de evaluar el funcionamiento del procedimiento antes mencionado. A continuación se muestran los resultados obtenidos considerando esos tres sitios hipotéticos.

En la figura II.2.7. Se

Figura II.2.7. Matriz de datos con los resultados de una priorización con 3 sitios hipotéticos, con valores extremos dados a cada criterio.

	Alta	Media	Baja							
1	(1.000)	2 (.335)	3 (.149)							
Ideal mode				RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	RATINGS	Fu
				Temperatura del sitio (L.: .024)	Precipitación en el sitio (L.: .037)	Tipo de hidrocarburo (L.: .058)	Tipo de suelo (L.: .027)	Uso de suelo (L.: .055)	Pendiente del terreno (L.: .029)	Hid sup (L.: .)
Alternative	Total	.024	.037	.058	.027	.055	.029			
Sitio 10	1.000	Alta	Alta	Gasovión	Alta	Agrícola	Abrupta			P
Sitio 20	.352	Media	Media	Turbosna	Media	Residencial	Moderada			Inte
Sitio 30	.141	Baja	Baja	Mezcla	Baja	Industrial	Suave			Inte

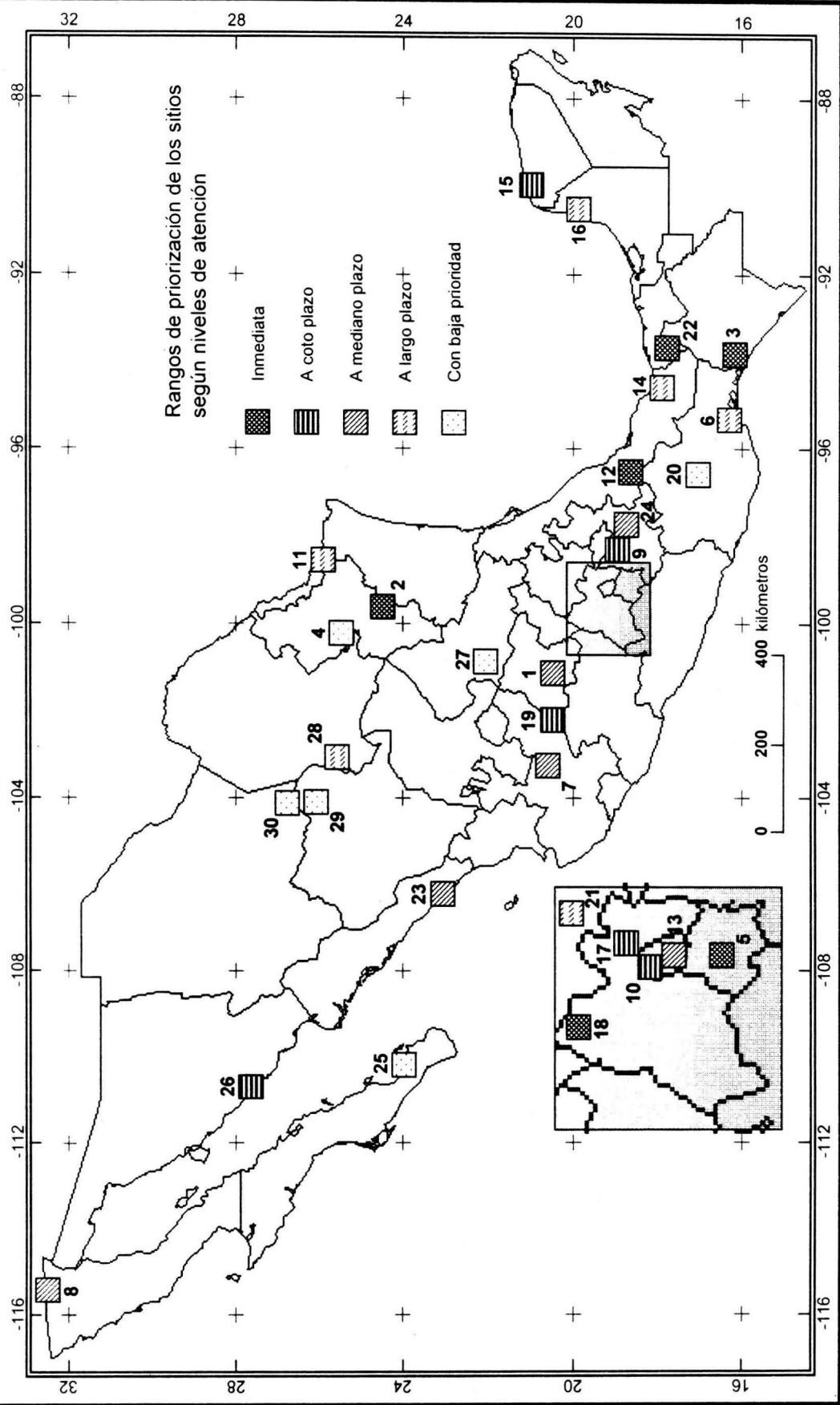
muestran los resultados del ejercicio de priorización antes descrito, en esta imagen se aprecia que efectivamente el modelo funciona ya que los resultados fueron los esperados, y así se comprueba en los diferentes sitios analizados, al darle el primer lugar de atención a aquel sitio hipotético (Sitio 10) al que se le asignaron los valores más críticos a los criterios involucrados, el segundo en cuanto a su atención, le correspondió al Sitio 20 al que se le asignaron los valores intermedios y al tercero para su atención (Sitio 30), le correspondió a aquel que se le asignaron los valores menos importantes en cuanto a las posibles afectaciones significativas que pudiera producir un derrame de hidrocarburos.

**Cuadro II.2.5.- Resultados del análisis de jerarquización y priorización de sitios con suelos contaminados con hidrocarburos.** Fuente: Elaborado por el autor

	Valores de priorización	Prioridad de atención
Sitios seleccionados		
01.- Refinería Salamanca, Guanajuato	0.386	16
02.- Est. Reb. 5 Linares Nuevo León	0.511	4
03.- TAD Arriaga, Chiapas.	0.548	2
04.- TAD San Rafael. Gpe. Nuevo León	0.283	25
05.- Gasolinera 452. Yautepec, Morelos.	0.559	1
06.- Polid. Ref-T. Maritima. Salina .Cruz. Oaxaca.	0.312	22
07.- TAD La Nogalera. Guadalajara, Jalisco.	0.387	15
08.- TAD Mexicali, Baja .California .Norte	0.411	13
09.- Polid. Mina-México, Amozoc, Puebla	0.424	11
10.- Gasolinera 3002, México, D.F.	0.484	7
11.- CPG, Reynosa, Tamaulipas.	0.319	21
12.- Polid. Nvo.Teapa-V. Carpio, Tierra B. Veracruz	0.497	5
13.- Ex-TAD 18 de Marzo, México, D.F.	0.390	14
14.- Refinería Minatitlán, Veracruz	0.330	20
15.- TAD Progreso, Yucatán	0.440	9
16.- TAD Lerma, Campeche	0.374	19
17.- Polid. La Cima-Azcapotzalco, Acolman, Edo. México.	0.436	10
18.- Polid. Tula-Toluca, Jilotepec, Edo. México	0.522	3
19.- Polid. Salamanca-Guadalajara, Degollado, Jalisco	0.421	12
20.- TAD Oaxaca, Oaxaca	0.282	26
21.- TAD Pachuca, Hidalgo	0.300	23
22.- Polid. Mina-Villahermosa, Huimanguillo, Tabasco	0.494	6
23.- Combust. Esperanza-CFE, Mazatlán, Sinaloa	0.375	18
24.- Oleod. Nvo.Teapa-V.Carpio, Acatzingo, Puebla	0.379	17
25.- TAD La Paz, Baja California Sur	0.205	30
26.- TAD Guaymas, Sonora	0.453	8
27.- TAD San Luis Potosí, San Luis Potosí	0.244	29
28.- Válvula de Seccio., Bolívar, Coahuila	0.294	24
29.- Válvula de Seccio. Conejos, Cd. Jiménez, Chihuahua	0.260	27
30.- Válvula de Secco. Ceballos, Durango	0.254	28

A continuación, a manera de ejemplo y como complemento del uso del procedimiento de jerarquización, se muestra un mapa (Figura II.2.8), en el que se ilustra la distribución espacial de los rangos estimados a partir de los resultados de priorización (Cuadro II.2.5) de los sitios seleccionados para este fin.

**Figura II.2.8. Priorización de sitios mediante el procedimiento de jerarquización.**



Fuente: Elaborado por el autor

En la figura anterior, como su nombre lo indica se muestran los rangos de valores de priorización obtenidos del análisis de jerarquización. Los rangos se seleccionaron dependiendo del lugar que le correspondió a cada sitio, así la agrupación de los primeros 6 (2, 3, 5, 12, 18 y 22) corresponden aquellos que deben atenderse de manera inmediata, esto por las condiciones tanto ambientales como sociales que les rodean. Al comparar estos lugares entre sí, se detectan algunas similitudes como lo es el presentar precipitaciones que se consideran altas (> a los 700 mm), también la mayoría presenta temperaturas de media a altas (26 a 30 °C), generando un mayor peligro, se encuentran a distancias de alguna falla o fractura consideradas de media a corta (8 a 1.25 km), lo que incrementa la posibilidad de contaminar los acuíferos, en los 6 sitios se registra la población más vulnerable y que corresponde a la de niños, en la mayor parte de los sitios se detecta un cuerpo de agua de tipo perenne, al igual que presentan afectaciones al agua subterránea y se detectan además profundidades de aguas subterráneas que van de media a mínima (18 a 3 m). Por otro lado, en términos generales, se observa que estos sitios se distribuyen al centro y sureste de la República Mexicana.

El segundo rango, representado por áreas que requieren de atención a corto plazo que podrían ser días, esta conformado por los siguientes sitios: 9, 10, 15, 17, 19 y 26 (Cuadro II.2.5). Estos lugares al igual que el grupo anterior la mayoría se encuentran distribuidos en el centro y sureste del territorio nacional. Estos sitios presentan pocas similitudes entre sí, siendo las más importantes, el tipo de hidrocarburo derramado que en la mayoría gasolina y gasolina – diesel, lo que le confiere a estos un estado de peligro latente, también presentan precipitaciones que van de media a alta (566 – 954 mm), 5 de estos lugares presenta mayormente población representada por niños y por último en 4 de los seis lugares se detectan profundidades del manto freático que van de los 18 a 0.85 m, aumentando las posibilidades de contaminación de estos acuíferos.

Los lugares que deben ser atendidos a mediano plazo (posiblemente semanas), y que corresponden al tercer rango o grupo esta formado por los siguientes sitios: 1, 7, 8, 13, 23 y 24. Estas áreas, se caracterizan entre si por presentar derrames de hidrocarburos más pesados que van de mezclas a combustóleo, en su mayoría son lugares que presentan temperaturas de media a alta (26.5 a 30.8 °C), aunque el factor temperatura es importante en relación a la generación de vapores orgánicos, el peligro se ve disminuido ya que estas áreas presentan hidrocarburos pesados, no se ubican en general cerca de fallas o fracturas, también 5 de los 6 que componen este grupo presentan uso de suelo de tipo industrial, se encuentran en áreas donde el agua subterránea se encuentra a profundidades de media a mínima (12.99 a 3.2 m) y casi toda se ubican en lugares con vegetación urbana. Al presentarse en la mayoría uso de suelo de tipo industrial y vegetación urbana, en estos lugares la prioridad se ve disminuida.

El cuarto grupo o rango lo forman los sitios 6, 11, 14, 16, 21 y 28, a estos se les cataloga como aquellos lugares con atención a largo plazo, pudiendo quedar en meses el tiempo para iniciar con los trabajos de restauración. Este grupo no tiene una distribución bien definida y se encuentra representado al norte, centro y sureste mexicano. Se caracteriza por presentar contaminación por hidrocarburos que están representados en su mayoría por mezcla diesel gasolina, con precipitaciones de media a alta en el norte, centro y sureste de la República Mexicana, el uso de suelo queda dentro del uso industrial en la mayoría de los sitios (5 de los 6), la población en estos lugares esta representado principalmente por mujeres y en algunos casos sin afectación posible, debido a la lejanía de estos con los lugares del derrame. También son sitios donde se ha afectado el agua subterránea que afortunadamente en esos lugares no tienen uso, lo anterior se ve favorecido por los niveles de profundidad del agua subterránea que son muy someros en la mayoría de estas áreas (18 – 1 m).

Por último se tiene un quinto rango, el cual está integrado por los siguientes sitios: 4, 20, 25, 27, 29 y 30 (Cuadro II.2.5). Con excepción de la Terminal de Almacenamiento y Distribución de Oaxaca que corresponde al sitio 20, los demás se ubican al norte de la República Mexicana. Una de las características que identifica a este grupo es que en general presentan precipitaciones de media a baja (680 – 166 mm), temperaturas de media a altas (28.1 – 30.9 °C), la hidrología superficial está representada por cuerpos de agua intermitentes en la mayoría de los casos y el agua subterránea se encuentra a profundidades que van de los 14 – 79 m.

Con el ejemplo anteriormente descrito, se aprecia que el procedimiento de jerarquización, lejos de arrojar solamente valores, es perfectamente aplicable a los análisis espaciales, con lo que se obtiene un panorama más completo y comprensible de las posibles soluciones en relación al establecimiento de mejores políticas de priorización para la atención de sitios contaminados, como sería la logística, en el traslado de infraestructura y personal, lo que repercutiría en una mejor administración en los presupuestos destinados para estos fines.

### **III. Análisis de resultados**

En este capítulo, se realizará una discusión y análisis de los resultados de priorización obtenidos mediante el modelo construido para este fin, al que se le incluirán algunas variantes; una será cambiando fórmulas dentro del modelo y la otra consistirá en aplicar el análisis a dos grupos diferentes de especialistas y se agregará una tercera que será realizada en forma individual por el autor.

Con lo anterior, se desea comprobar que el modelo, parte medular del procedimiento, funciona de igual manera, no importando el grupo de especialistas de que se trate y que participe en el análisis. Por último se llevará a cabo una etapa de selección del modelo que incluya las fórmulas que se consideren sean las más adecuadas para mejorar el desempeño y funcionamiento, esto para la obtención de resultados lógicos y convincentes en cuanto a la priorización de sitios contaminados, objetivo del presente estudio.

Por otra parte, se hará una recapitulación de los resultados parciales obtenidos en las secciones anteriores, esto se hará de forma breve y mediante la elaboración de un diagrama, el cual contendrá los pasos más importantes realizados para la obtención del procedimiento de jerarquización y priorización, con lo que se llevará a cabo la documentación del procedimiento desarrollado.

#### **III.1. Método de ponderación de la información**

Una vez construido el modelo, para la obtención de la jerarquización y por lo tanto de priorización en cuanto a la atención de sitios contaminados y haber comprobado su funcionalidad, el siguiente paso consistió en determinar cuales eran las mejores condiciones de operación del modelo para la obtención de resultados más confiables y convincentes.

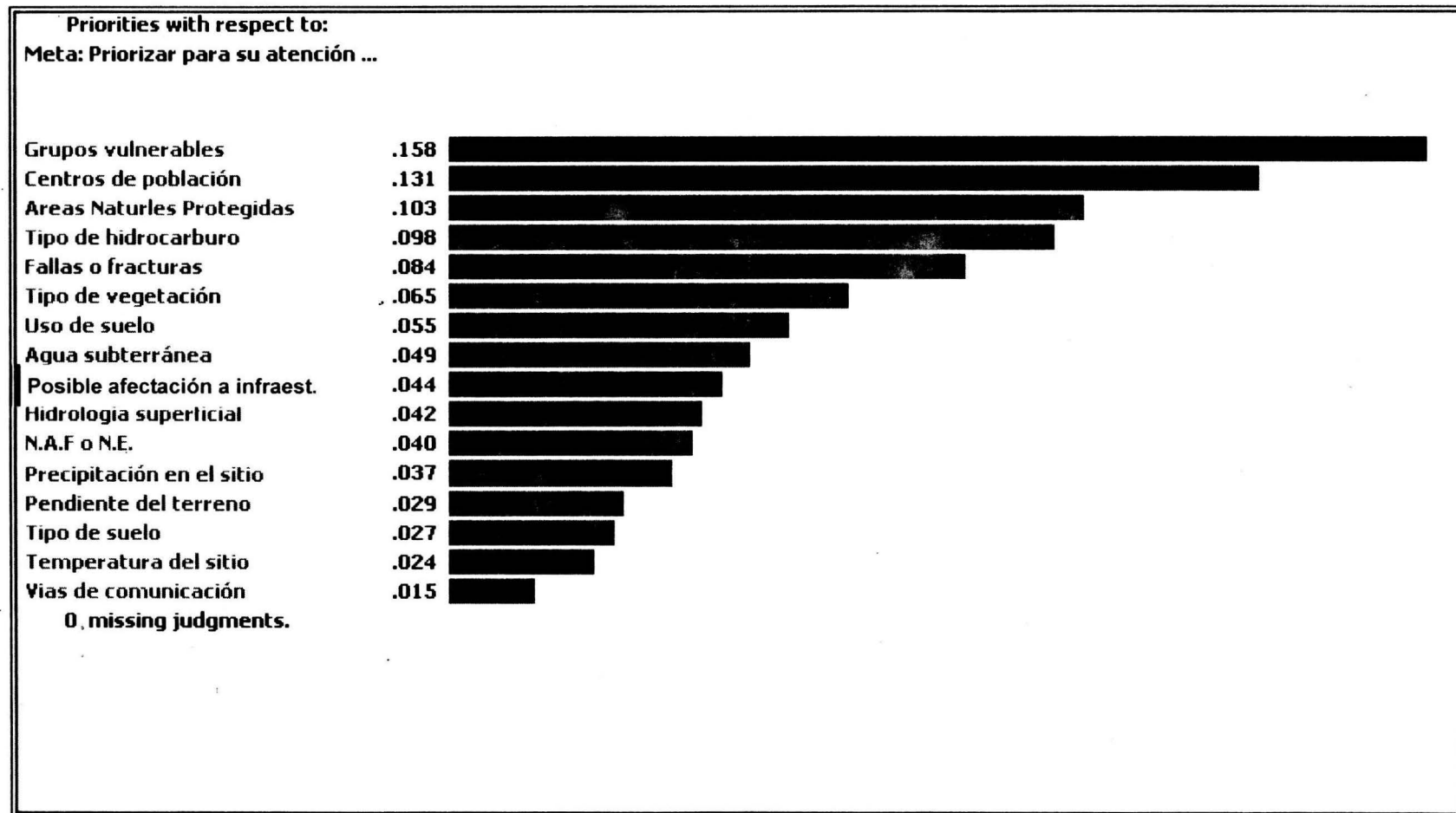
Para este caso, el modelo de priorización se aplicó a dos grupos de especialista y uno en forma individual. Uno de los grupos estaba conformado por estudiantes de



la maestría en Geografía y se realizó en el Instituto de Geografía (IG), este grupo se caracterizaba por ser algo heterogéneo (Biólogos, Geógrafos, Arquitectos, Ingenieros Ambiental, Agrónoma, Lic. Planeación Territorial, etc.); otro grupo estuvo integrado por especialistas en diagnóstico, remediación de suelos y estudios de riesgo del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), este grupo fue más homogéneo (Ingenieros Químicos y en su mayoría Biólogos y Ecólogos); por último, un tercer ejercicio fue realizado por el autor (Individual). Las dos sesiones en grupo antes mencionadas, se llevaron a cabo los días 18 y 19 de mayo del presente año. Los resultados (parciales) de las importancias relativas de los criterios que se obtuvieron de cada grupo y en forma individual se muestran en los histogramas de las figuras III.1.1 a III.1.3. En términos generales se observa que los valores más altos correspondieron a los criterios sociales en las tres evaluaciones.

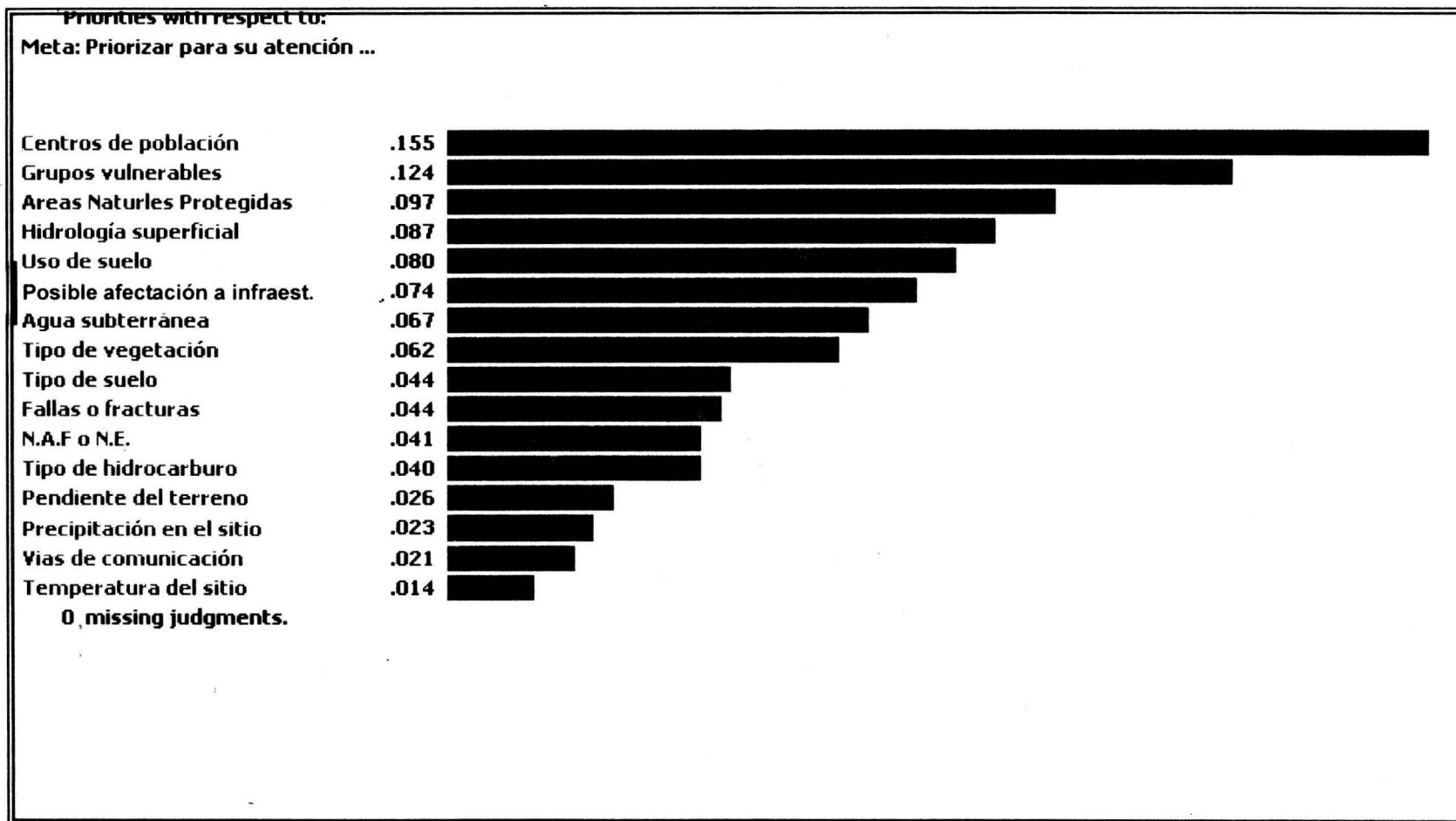
También se agregaron otras dos variantes, estas consistieron en la aplicación de fórmulas diferentes dentro del modelo. En una sólo se aplicó la de "Ratings", la cual permite trabajar comparaciones con valores cualitativos, que para este caso fueron las divisiones de los criterios en subcriterios y de rangos; para el segundo caso se aplicó una combinación de fórmulas que acepta tanto valores cualitativos ("Ratings"), como cuantitativos ("Increasing y decreacing"), estos últimos dependiendo de la naturaleza de los valores y la relación que exista entre el criterio y la meta de la jerarquización. Los resultados de priorización de los 30 sitios seleccionados con problemas de contaminación, fueron obtenidos mediante la técnica de jerarquización (AHP) y con el uso del programa de computación "Expert Choice", al respecto se obtuvieron 6 combinaciones considerando las variantes antes mencionadas, cuyos resultados de priorización de cada combinación se muestran en el cuadro III.1.1.

Figura III.1.1. Histograma con valores de importancias relativas de los criterios, obtenidos en forma Individual (SMV).



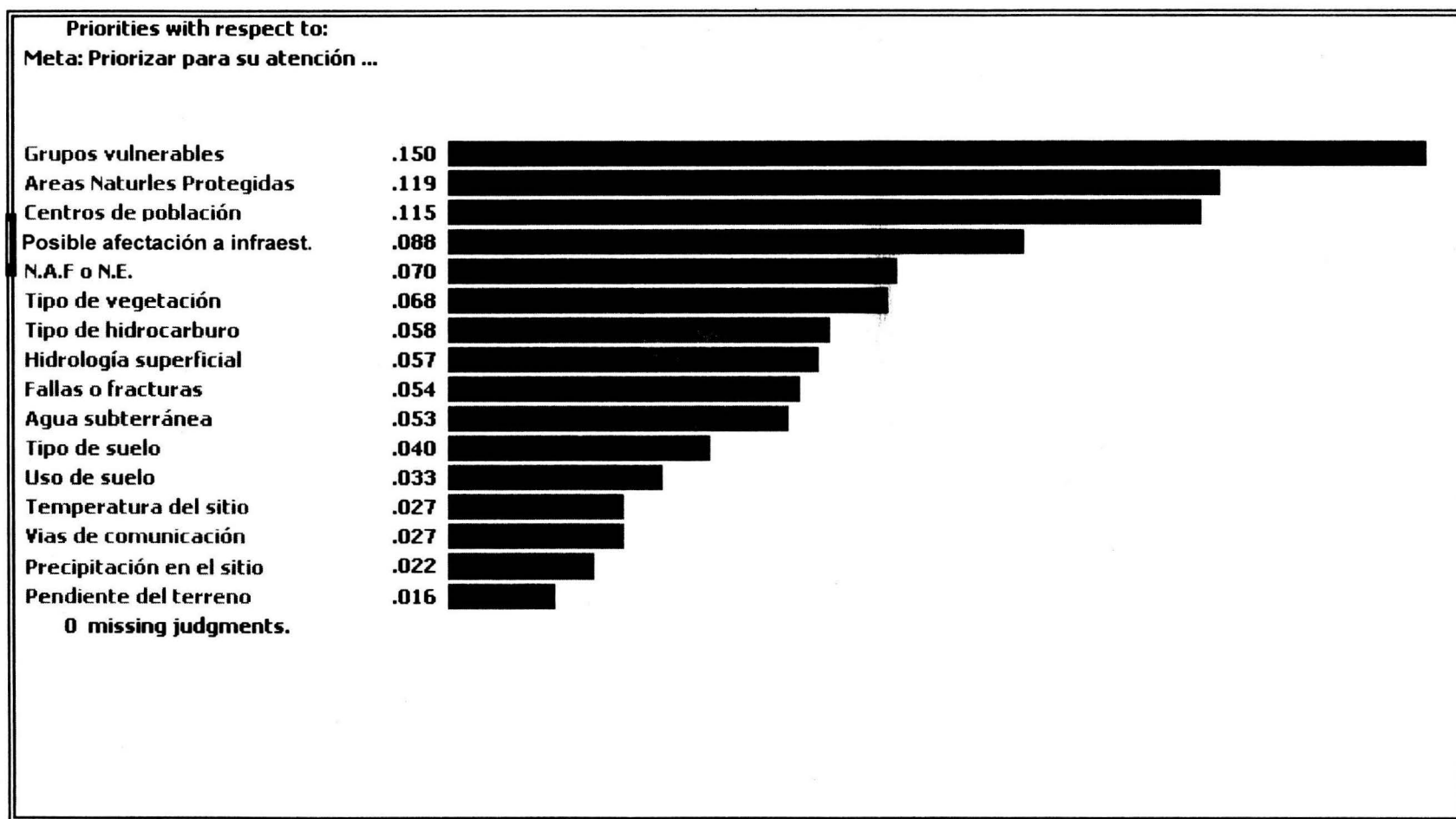
Fuente: Elaborado por el autor

Figura III.1.2. Histograma con valores de importancias relativas de los criterios, obtenidos en grupo (Instituto de Geografía).



Fuente: Elaborado por el autor

Figura III.1.3. Histograma con valores de importancias relativas de los criterios, obtenidos en grupo (Instituto Mexicano del Petróleo).



Fuente: Elaborado por el autor

**Cuadro III.1.1.- Resultados de priorización de las 6 combinaciones propuestas para determinar la funcionalidad del modelo de jerarquización.** Fuente: Elaborado por el autor

Sitios seleccionados	Combinaciones de grupos y fórmulas diferentes y sus valores de priorización					
	SMV1	SMV2	IMP1	IMP2	IG1	IG2
01 - Refinería Salamanca, Gto.	0.386	0.430	0.435	0.494	0.443	0.476
02 - Est. Reb. 5 Linares N.L.	0.511	0.496	0.564	0.563	0.533	0.525
03 - TAD Arriaga, Chis.	0.548	0.565	0.520	0.548	0.456	0.502
04 - TAD San Rafael, Gpe. N.L.	0.283	0.329	0.304	0.366	0.322	0.358
05 - Gasolinera 452, Yautepec, Mor.	0.559	0.553	0.527	0.541	0.532	0.535
06 - Polid. Ref-T Marítima, S.C. Oax.	0.312	0.299	0.332	0.316	0.314	0.304
07 - TAD La Nogalera, Guadalajara, Jal.	0.387	0.417	0.402	0.450	0.404	0.465
08 - TAD Mexicali, B.C.N.	0.411	0.377	0.425	0.396	0.372	0.336
09 - Polid. Mina-México, Amozoc, Pue.	0.424	0.494	0.381	0.443	0.393	0.480
10 - Gasolinera 3002, México, D.F.	0.484	0.462	0.461	0.449	0.470	0.443
11 - CPG, Reynosa, Tamps.	0.319	0.361	0.327	0.386	0.299	0.373
12 - Polid. Nvo Teapa-V. Carpio, Tierra B. Ver.	0.497	0.465	0.486	0.460	0.501	0.452
13 - Ex-TAD 18 de Marzo, México, D.F.	0.390	0.369	0.392	0.381	0.396	0.369
14 - Refinería Minatitlán, Ver.	0.330	0.330	0.359	0.367	0.360	0.359
15 - TAD Progreso, Yuc.	0.440	0.410	0.460	0.427	0.434	0.371
16 - TAD Lerma, Camp.	0.374	0.365	0.372	0.391	0.374	0.377
17 - Polid. La Cima-Azcapotzalco, Acolman, Mex.	0.436	0.524	0.393	0.504	0.396	0.512
18 - Polid. Tula-Toluca, Jilotepec, Mex.	0.522	0.549	0.484	0.527	0.501	0.524
19 - Polid. Salamanca-Guadalajara, Degollado, Jal.	0.421	0.465	0.384	0.424	0.387	0.466
20 - TAD Oaxaca, Oax.	0.282	0.342	0.303	0.366	0.276	0.361
21 - TAD Pachuca, Hgo.	0.300	0.241	0.275	0.239	0.269	0.259
22 - Polid. Mina-Villahermosa, Huimanguillo, Tab.	0.494	0.437	0.496	0.429	0.510	0.414
23 - Combust. Esperanza-CFE, Mazatlán, Sin.	0.375	0.313	0.364	0.335	0.393	0.362
24 - Oleod. Nvo. Teapa-V. Carpio, Acatzingo, Pue.	0.379	0.471	0.372	0.475	0.379	0.481
25 - TAD La Paz, B.C.S.	0.205	0.219	0.205	0.219	0.209	0.227
26 - TAD Guaymas, Son.	0.453	0.510	0.450	0.495	0.432	0.456
27 - TAD San Luis Potosí, S.L.P.	0.244	0.270	0.240	0.274	0.239	0.290
28 - Válvula de Seccio., Bolívar, Coahuila	0.294	0.338	0.301	0.352	0.305	0.379
29 - Válvula de Seccio. Conejos, Cd. Jiménez, Chih.	0.260	0.250	0.229	0.216	0.261	0.239
30 - Válvula de Secco. Ceballos, Dgo.	0.254	0.288	0.234	0.267	0.258	0.317

Notas: SMV. Iniciales del autor análisis en forma individual IMP. Instituto Mexicano del Petróleo, análisis en grupo IG. Instituto de Geografía, UNAM, análisis en grupo1. Fórmula "Ratings", comparaciones únicamente cualitativas  
 2.- Fórmulas "Ratings", "Increasing" y "Decreasing", comparaciones cualitativas y cuantitativas

En el cuadro III.1.1, se muestran los seis conjuntos de datos de priorización, obtenido del análisis aplicado a cada grupo (indicado por las literales) y con sus dos variantes en cuanto a fórmulas (indicado por números), así IMP1 indica que el análisis fue aplicado al grupo del Instituto Mexicano del Petróleo y el número 1

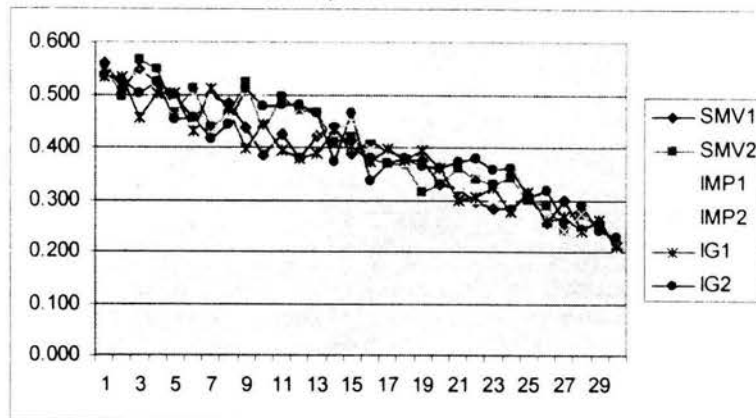
significa que el modelo contiene solamente fórmulas "Ratings", que trabajan con comparaciones de subcriterios cualitativos o de rangos. Las literales SMV corresponden a las del autor y a un análisis llevado a cabo en forma individual; IG corresponde al grupo del Instituto de Geografía que participó en la evaluación de priorización y por último el número 2 corresponde al modelo que contiene tanto formulas "Ratings" que permite realizar comparaciones cualitativas de criterios y por otro lado fórmulas "monotónicas" que consideran datos duros o reales y su relación con respecto a la meta de priorización, estas fórmulas pueden ser funciones al incremento o decremento (increasing o decreasing). Para ejemplificar la fórmula "Increasing", se considerará la temperatura; la definición de este criterio menciona que a **mayor temperatura** existirá **mayor probabilidad** de un incendio o explosión en el sitio del derrame y viceversa, estableciéndose una relación directa. Ahora bien, para el caso de la aplicación de la función "decreasing" se tomará como ejemplo el criterio de fallas o fracturas, donde a **mayor distancia** se encuentren estas del sitio del derrame **será menor la probabilidad** de infiltración del hidrocarburo y por lo tanto de contaminar el agua subterránea, (relación inversa).

Como comprobación de resultados y para poder definir cuales serían las mejores condiciones de operación del modelo, se realizaron varias pruebas a los resultados de priorización obtenidos de las 6 combinaciones propuestas, que permitieron establecer estas condiciones de operación del modelo, dentro del procedimiento de jerarquización, a continuación se discuten y analizan los resultados arrojados.

Una de las pruebas que se le aplicaron a los resultados de priorización, fue la de correlación, como se sabe el coeficiente de correlación proporciona una medida de la asociación lineal entre dos variables. Por lo que antes de aplicarla es recomendable situar las variables en una gráfica (Johnson, 2000). En el gráfico III.1.1, se incluye el comportamiento de los diferentes resultados de priorización

(6), en el cual se aprecia claramente que la tendencia es la misma y con valores muy similares, lo cual evidencia que existe relación entre estas seis poblaciones de datos, además de mostrar como

Gráfico III.1.1. Comportamiento de los resultados de priorización de las 6 poblaciones de datos



están relacionadas, por lo que se justifica el realizar la prueba de correlación entre estas poblaciones de datos.

Al aplicar la prueba de correlación “r”, a las 6 poblaciones de datos de priorización de las todas las combinaciones (15 combinaciones), se obtuvieron los siguientes coeficientes de correlación (cuadro III.1.2).

**Cuadro III.1.2. Resultados obtenidos al aplicar las correlaciones de Pearson (r).**

	SMV1	SMV2	IMP1	IMP2	IG1	IG2
SMV1	1	0.9070	<b>0.9646</b>	0.8820	<b>0.9566</b>	0.8343
SMV2		1	0.8579	<b>0.9595</b>	0.8472	<b>0.9567</b>
IMP1			1	0.9021	<b>0.9722</b>	0.8135
IMP2				1	0.8749	<b>0.9613</b>
IG1					1	0.8284
IG2						1

Fuente: Elaborado por el autor

Una correlación es la variación simultánea de dos variables, el término se debe a Kart Pearson (Reyes, 1980, citado en Ochoa, 1995). Indica aquellos casos en que los cambios de una variable van asociados con los cambios de otra variable, en otras palabras la covariabilidad de dos variables (Yamane, 1979) o sea la posible relación o asociación de una población de datos con otra, que para el presente caso es la correlación (r) entre los resultados de priorización obtenidos por 6 métodos diferentes en un mismo modelo de jerarquización. Cuando el valor de “r”

es o tiende a ser cero se habla de variables o poblaciones de datos independientes y si tiende al valor de 1 o -1, entonces se habla de variables correlacionadas. Para discernir si una correlación es o no significativa, se debe de aplicar la prueba correspondiente, misma que toma en consideración el número de datos, la varianza y el valor de "r", con una confiabilidad del 95%, en todas las combinaciones realizadas aquí se obtuvieron correlaciones significativas.

Aplicar esta prueba tuvo como propósito, identificar si existen asociaciones o relaciones entre los diferentes resultados de priorizaciones, obtenidas al probar el modelo construido para ello, con la aplicación de ciertas variantes y con esto poder definir si el modelo, da resultados similares no importando el grupo de especialistas al que se le aplique el modelo. Las variantes aplicadas al modelo fueron; a) el haber realizado la evaluación por grupos diferentes, en forma individual por el autor (SMV), un grupo de estudiantes de la maestría en Geografía (más diverso, IG) y otro grupo de especialistas del Instituto Mexicano del Petróleo (más homogéneo, IMP), y b) el haber variado las fórmulas en el modelo (Cualitativas o de rangos, "Ratings") con una mezcla de cualitativos (rangos, "Ratings") y cuantitativos (datos duros o reales, "increasing" o "decreasing").

Los resultados de esta prueba se muestran en el cuadro III.1.2, en este se observa que todas las correlaciones son altas, claro unas más que otras. Al respecto se logra distinguir que las mejores correlaciones (resaltados en negritas) son aquellas que corresponden a comparaciones del modelo con las mismas fórmulas, no importando el grupo que haya llevado a cabo la evaluación.

Lo anterior permite concluir, que para obtener buenos resultados y convincentes al aplicar el modelo de priorización de sitios contaminados, no importa que grupo participe en la evaluación (homogéneo o heterogéneo). Y por otro lado refleja que es mejor cuando se aplica a un grupo de especialistas relacionados con la problemática ambiental, en lugar de realizar dicha evaluación en forma individual.



Para reforzar lo anterior, se llevó a cabo otra prueba complementaria, la cual consistió en la aplicación de los porcentajes de similitud de los 6 resultados de priorización obtenidos, como ya fue comentado anteriormente, variando algunos parámetros (grupos y fórmulas). A continuación se muestra el cuadro III.1.3 el cual contiene los resultados obtenidos al realizar las combinaciones posibles.

**Cuadro III.1.3. Resultados obtenidos al aplicar los porcentajes de similitud (Sumatoria de los porcentajes más bajos).**

	SMV1	SMV2	IMP1	IMP2	IG1	IG2
SMV1	100	95.3831	<b>97.3407</b>	95.0534	<b>97.3004</b>	93.9706
SMV2		100	94.5858	<b>97.1524</b>	94.4778	<b>96.9171</b>
IMP1			100	95.5048	<b>*97.7912</b>	93.9903
IMP2				100	95.3290	<b>*97.4162</b>
IG1					100	94.3841
IG2						100

Fuente: Elaborado por el autor

La prueba de % de similaridad refleja para este caso, los cambios en el número o valor de priorización y presenta valores progresivamente mayores entre más semejantes sean las proporciones de estos valores. Este índice o prueba toma valores de 100 cuando las poblaciones de datos son idénticas y, valores de cero cuando son distintas. Su fórmula involucra la sumatoria de los porcentajes más bajos entre pareja de datos (Sokal y Rholf, 1985, citado en Ochoa, 1995).

Los resultados de los porcentajes de similitud, al igual que para el caso de las correlaciones, fueron altos y también correspondieron sus máximos (negritas), a aquellos en los que el análisis se aplicó grupos de especialistas, en comparación al que llevó a cabo el autor en forma individual. Con lo que se confirma lo concluido en párrafos anteriores.

En resumen, después de haber aplicado las dos pruebas anteriores a los 6 grupos de datos de priorización, se concluye que los mejores resultados, son los que se obtienen, cuando el modelo se aplica a grupos de trabajo ya sean homogéneos o heterogéneos y en menor grado en forma individual.

Otro aspecto que resultó del análisis anterior, es que no importa que fórmula y combinación de estas se aplique al modelo, los resultados siguen siendo buenos, aunque existe un principio básico que siempre será mejor cuando dentro del análisis se anteponga la importancia que tienen los datos duros o reales a los rangos, mismos que siempre serán discutibles.

### **III.2. Documentación del procedimiento desarrollado**

En este subcapítulo se hará una reseña breve de cómo fueron los pasos para desarrollar el procedimiento de jerarquización, con la obtención de los valores de priorización de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos. Para lo cual se vio que la mejor manera de realizar lo anterior y dejar documentado el procedimiento, aparte de lo expuesto a lo largo de este documento, era mediante el uso de un diagrama de flujo. En la figura III.2.1 se muestra el diagrama con los pasos más importantes para el desarrollo del procedimiento antes mencionado.

Como primer paso, se debe definir claramente el problema, que para el presente estudio, corresponde a la gran cantidad de sitios con problemas de contaminación por hidrocarburos en suelos, también, aquí mismo se identifica la meta u objetivo principal, que en este caso, es el de desarrollar un procedimiento para jerarquizar sitios contaminados para su atención.

Para llevar a cabo lo anterior y como parte elemental, el segundo paso consiste en recopilar la información relacionada con sitios contaminados. Después viene una evaluación y validación de la información recopilada, si es veraz y de calidad satisfactoria, que conduce al siguiente paso, de lo contrario se retornará a la recopilación de información hasta que se obtenga la que satisfaga lo requerido.

El tercer paso se refiere al procedimiento que se llevó a cabo para la identificación y selección de los criterios y subcriterios de decisión, tanto ambientales como sociales, mismos que se obtuvieron mediante el diseño y aplicación de un cuestionario llamado "Opinión de Expertos", el cual fue aplicado y contestado por

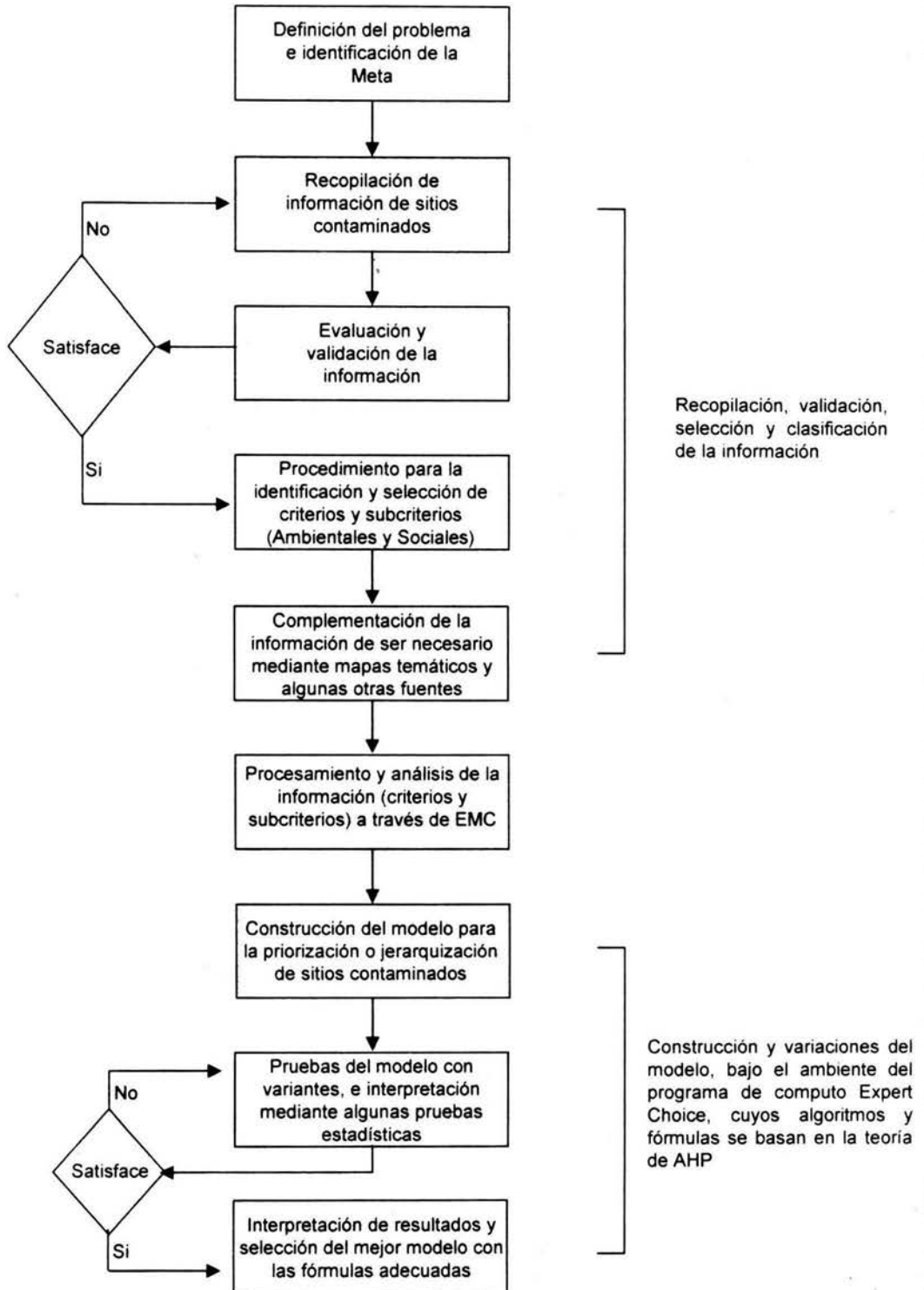
un grupo de especialistas relacionados con el quehacer ambiental, y donde resultaron los 16 criterios seleccionados para formar parte del análisis de jerarquización.

Una vez que se tuvieron los criterios, se revisó la información con la que se contaba hasta ese momento, y se llevó a cabo el cuarto paso que fue el de complementar la información de los sitios contaminados y seleccionados, ya que efectivamente se carecía de la información de varios de los criterios seleccionados, principalmente de los sociales.

Ya que se tenían: la meta del problema, los criterios y subcriterios (Ambientales y Sociales) y las alternativas (sitios contaminados), se inició con el procesamiento y análisis de la información con base en la evaluación multicriterio. Para llevar a cabo esta evaluación, fue necesario la utilización de la técnica denominada AHP (Analytic Hierarchy Process), para la elaboración del modelo para realizar el análisis de priorización de sitios contaminados.

El quinto paso corresponde a una serie de ensayos de prueba y que en este caso corresponden al empleo de algunas variantes dentro del modelo como es el combinar algunas fórmulas (ratings, increasing y decreasing), así como aplicarlo a grupos de especialistas diferentes, y en todos los casos probar el comportamiento del modelo y del análisis de los resultados obtenidos, con el propósito de identificar cual de todos ellos produce una mejor priorización de los sitios contaminados, considerando las características o criterios que rodean, definen o caracterizan a los diferentes sitios. En adición, para verificar que el modelo funciona adecuadamente se llevaron a cabo evaluaciones con sitios y criterios hipotéticos extremos e intermedios y de esta manera probar si el modelo reproduce los resultados esperados, dicho de otra manera si el modelo produce resultados precisos.

Figura III.2.1. Diagrama de flujo de los pasos más importantes para el desarrollo del procedimiento de jerarquización de sitios contaminados



También se llevaron a cabo pruebas estadísticas que permitieron hacer la selección del modelo que incluye cierto tipo de fórmulas que dependen de la naturaleza de los datos (cualitativos o cuantitativos), esto con el propósito de probar la repetibilidad y consistencia de los resultados tanto al aplicar el modelo de jerarquización con diferentes grupos de personas o especialistas así como al variar los diferentes algoritmos de cálculo para estimar el nivel de prioridad de los distintos pasivos ambientales o sitios contaminados.

En su conjunto las pruebas de precisión y repetibilidad tuvieron como propósito verificar la calidad de esquema desarrollado y determinar con esto bajo que condiciones se obtienen los mejores resultados y si estos son convincentes en términos de la priorización o jerarquización.

Es importante comentar que la elaboración del modelo y sus variaciones para la obtención de los valores de priorización, fue llevada a cabo bajo el ambiente del programa de cómputo "Expert Choice", ya que como se mencionó en su oportunidad, algunos de los algoritmos y fórmulas de este "software", están basados en la teoría de AHP, desarrollada por Thomas L. Saaty.

Con todo lo anterior, se logró cumplir con el objetivo central del presente estudio, que fue el de desarrollar un procedimiento de jerarquización el cual permite establecer políticas de priorización para la atención de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos.

## **IV. Conclusiones y beneficios**

### **IV.1. Conclusiones**

En este estudio, se confirmó que la aplicación del método de la toma de decisiones con base a multicriterios (MCDM), resultó ser una excelente herramienta para el desarrollo del procedimiento de jerarquización de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos, basadas en una meta, con un alto número de alternativas y criterios, tanto ambientales como sociales, resultando una aplicación nueva y original en México.

El proceso de jerarquización aquí desarrollado es un procedimiento metodológico novedoso al término del cual los investigadores o ejecutivos, potencialmente usuarios de esta metodología, pueden generar criterios de decisión sobre la jerarquización o priorización de sitios contaminados para con base en esta información, orientar sus políticas ambientales y recursos económicos necesarios para emprender actividades de restauración.

Es un producto novedoso ya que integra tanto las experiencias de diversos especialistas abocadas a las tareas de caracterización ambiental y restauración de sitios contaminados con herramientas de vanguardia soportadas en métodos de evaluación multicriterio, y que usan técnicas AHP, basada en comparaciones pareadas "pairwise", las cuales se realizan con base en conocimiento y considerando y los puntos de vista de diversos especialistas o expertos mencionados anteriormente.

Otro aspecto que se logró identificar, es que los criterios sociales son los más importantes a considerar cuando se trate de darle prioridad en cuanto a la atención de un sitio contaminado.

Al término de la presente investigación, se concluye que la mayoría de los expertos en México consideran más importantes los parámetros o criterios

sociales, seguido de los ambientales y que aspectos como el económico no figuran, no por menos importantes y sí quizá por vacíos legales existentes en la legislación del país.

Se logró obtener los 16 criterios más relevantes, para ser considerados como mínimo en el análisis de problemas de jerarquización de sitios con suelos contaminados con hidrocarburos, con base en la opinión de la mayoría de los expertos encuestados, estos fueron:

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1. Tipo de contaminante                | 9. Cercanías a centros de población |
| 2. Precipitación                       | 10. Hidrología superficial          |
| 3. Temperatura                         | 11. Aguas subterráneas              |
| 4. Fallas o Fracturas                  | 12. Tipo de vegetación              |
| 5. Tipo de suelo                       | 13. Cercanías a ANP                 |
| 6. Uso de suelo                        | 14. Vías de Comunicación            |
| 7. Grupos vulnerables                  | 15. Pendiente del terreno           |
| 8. Afectación a infraestructura urbana | 16. NAF o N. E                      |

Cada uno de estos criterios fue dividido en distintos subcriterios a los que se les asignó valores (cualitativos o cuantitativos), necesarios para ponderar los pesos y contribuciones de cada criterio en el proceso de jerarquización de sitios contaminados. Esta segunda división es una contribución del autor y aunque en todos los casos se basa en conceptos comprobables, ampliamente aceptados pueden ser perfectibles en todo momento y que en el caso de que así ocurriera, el procedimiento de ponderación aquí propuesto se vera robustecido.

El mejor modelo para jerarquizar sitios contaminados para su atención, resultó el que se basa en el análisis mediante las matrices de datos o también llamadas de decisión, el cual permite trabajar con un gran número de alternativas.

Asimismo, se concluye que para la obtención de resultados convincentes, este tipo de análisis debe de realizarse bajo las opiniones y puntos de vista de grupos de

trabajo, formados por especialistas relacionados con el quehacer ambiental, donde no importa que tan homogéneo o heterogéneos sean estos, en lugar de realizar dicha evaluación en forma individual.

## **IV.2. Beneficios**

El proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003 Que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y restauración, también incluye procedimientos de muestreo, propone valores límite permisible en suelos en función de su uso y en caso de sobrepasar estas condiciones hace obligatorio para el generador, emprender acciones de restauración.

La investigación aquí desarrollada muestra que los trabajos de caracterización ambiental deben necesariamente incluir una visión mucho más amplia, que no sólo considere valores numéricos sino también incluya la perspectiva social y geográfica aparentemente olvidada por los legisladores mexicanos.

Se propone que al menos 16 criterios son necesarios como mínimo de información para realizar una buena caracterización y posteriormente una adecuada jerarquización para la atención de pasivos ambientales. Este es un esquema de trabajo más realista, particularmente en un país como el nuestro, en donde los recursos económicos para la atención de pasivos ambientales son limitado.

En este trabajo de tesis se proponen e incluyen parámetros tanto ambientales como sociales, los cuales serán de gran utilidad en el desarrollo de cédulas de evaluación de sitios contaminados. Al respecto se generó un archivo que contiene estos criterios y la forma en que son organizados y subdivididos en subcriterios, en un banco de datos.

En el marco de lo comentado anteriormente, en el presente documento se desarrolla y fundamenta un procedimiento novedoso que permitirá la identificación



y jerarquización para su atención de los sitios con suelos contaminados por hidrocarburos de PEMEX (y cualquier otra empresa con problemas similares), el cual está integrado por criterios de evaluación tanto ambientales como sociales, mismos que incluyen información Geográfica, de Clima, de Población, Hidrológica, Geológica, Ecológica, Geohidrológica, Química, etc., todo esto en un sistema integral que facilitará la toma de decisiones, este es un esquema más completo y que también es técnica y económicamente factible de ser incluido en todo estudio de caracterización.

A manera de ejemplo y como complemento del uso del procedimiento de jerarquización, se podría incluir mapas (probablemente en formato compatible con ArcView), con ubicación geográfica de los sitios, además de contener vínculos con los resúmenes de información asociados que respalden y representen espacialmente la información obtenida.

## **Bibliografía**

- Aneas de Castro, S. D., (2000). Riesgos y peligros: Una visión desde la Geografía. Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona (ISSN 1138-9788) 60 (2000). <http://www.ub.es/geocrit/sn-60.htm>.
- Avila, M. R., (2000). Proyecto Regional *Información sobre tierras y aguas para el desarrollo agrícola sostenible* (Proyecto GCP/RLA/126/JPN, FAO), El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras. El caso de Brasil. Informe técnico No. 2 Santiago de Chile, Chile. [http://www.ric.fao.org/proyecto/gcp/rla/126/jpn/documents/Informes%20T%C3%A9cnicos/2\\_AHP.pdf](http://www.ric.fao.org/proyecto/gcp/rla/126/jpn/documents/Informes%20T%C3%A9cnicos/2_AHP.pdf)
- Ayllon T. T. & J. F. Chavez. (1994). *México: sus recursos naturales y su población*. Segunda Edición. Limusa. México.
- Calderón A. G., (2001). *Construcción y reconstrucción del Desastre*. Ed. Plaza y Valdés, S. A. de C. V., primera edición, México.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México, Pasado, Presente y Futuro*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto de Biología de la UNAM y Agrupación Sierra Madre, S.C., México.
- Ceballos, S. A. y López B. J. (2003). *Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in Central Mexico: a multi-criteria and GIS approach*. ELSEVIER publication, *Agricultural System* 77 (2003), 117 - 136
- (2003 b). *Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico*. ELSEVIER publication, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95 (2003), 371 – 377.
- Custodio, E. y Llamas, M.A., (1983). *Hidráulica Subterránea*, Segunda Edición, Editorial OMEGA, S.A. Tomos I y II., Barcelona España.
- Díaz S.J. y López, B. J., (2000). *Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis de multicriterio con un SIG*. Investigaciones Geográficas, Boletín 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F.

- Expert Choice, Inc., (2001). *Expert Choice 2000: Part I. Quick star guide and Part II. Tutorials*. Pittsburgh, P.A., USA.
- IMP, (1994). *Evaluación de hidrocarburos en el subsuelo por medio de gasometrías al sur de la refinería Ing. Antonio M. Amor, Salamanca, Gto.*
- , (1995 a). *Evaluación del contenido de hidrocarburos del subsuelo y agua subterránea en áreas asociadas a las operaciones de los ductos Madero-Cadereyta.*
- , (1995 b). *Evaluación de hidrocarburos en el subsuelo por medio de gasometrías en la terminal de ventas en San Rafael, municipio de Guadalupe, Edo. Nuevo León.*
- , (1996 a). *Evaluación de la probable contaminación del subsuelo y agua subterránea en el entorno al predio "la capilla" ubicado en la calle real de Apizaco no. 25 en Yautepec, Morelos.*
- , (1996 b). *Evaluación de hidrocarburos en el subsuelo por medio de sondeos (zanjas) y gasometrías en el entorno a el área Km. 1 + 350 del derecho de vía (D.D.V.), refinería-terminal marítima de Salina Cruz, Oaxaca.*
- , (1996 c). *Evaluación del grado de contaminación del subsuelo y agua subterránea en la ex-Terminal de Recibo y Distribución (TRD) "La Nogalera", Guadalajara, Jalisco.*
- , (1996 d). *Evaluación de la distribución de hidrocarburos en el subsuelo de la Superintendencia Local de Ventas de Arriaga, Chapas.*
- , (1996 e). *Evaluación del estado actual de la contaminación por hidrocarburos en el subsuelo y manto freático de la terminal de Almacenamiento y Distribución (TAD) de Mexicali, B.C.N.*
- , (1996 f). *Evaluación de la posible contaminación en el subsuelo por la fuga del poliducto Minatitlán-México en el Km. 408+564 en Amozoc, Puebla.*
- , (1996 g). *Evaluación del subsuelo en el área afectada de la gasolinera 3002, México, D.F.*

- , (1997 a). *Evaluación del estado actual de la contaminación por hidrocarburos en el subsuelo del complejo procesador de gas, Reynosa, Tamaulipas. (fase I).*
- , (1997 b). *Estudio de la posible contaminación en el subsuelo por la fuga del Poliducto' de 12 " Nuevo Teapa – Venta de Carpio Km 216+709, Tierra Blanca, Veracruz.*
- , (1997 c). *Diagnóstico de la contaminación en el subsuelo del área de embarques y reparto en el ex - refinería 18 de Marzo, México, D .F.*
- , (1998 a). *Estudio de caracterización y evaluación de la contaminación por hidrocarburos en suelo, subsuelo y manto freático somero en la refinería Gral. Lázaro Cárdenas, Minatitlán, Veracruz.*
- , (1998 b). *Estudio de la posible presencia y distribución de hidrocarburos en el subsuelo de 7 superintendencias de ventas de la gerencia comercial zona sur de PEMEX-Refinación (Progreso, Yucatán).*
- , (1998 c). *Estudio de la posible presencia y distribución de hidrocarburos en el subsuelo de 7 superintendencias de ventas de la gerencia comercial zona sur de PEMEX-Refinación (Lerma, Campeche).*
- , (1998 d). *Estudio de la distribución de los hidrocarburos en el subsuelo, evaluación y saneamiento de la contaminación del manto freático (manantiales), entorno a al fuga del poliducto Tula-Toluca Km. 41+300, municipio de Jilotepec Estado de México.*
- , (1999). *Estudio de la distribución de hidrocarburos en el subsuelo circundante a la fuga ocurrida en el poliducto de 14" la Cima-Azcapotzalco Km. 202+00, municipio de Acolman, Estado de México.*
- , (2000). *Diagnóstico de la contaminación por hidrocarburos en el subsuelo de tres terminales de almacenamiento y distribución por medio de gasometrías (Pachuca, Hidalgo, Cuautla, Morelos y Oaxaca, Oaxaca).*
- , (2002). *Cuantificación de la contaminación mediante TPH´s (EPA-418.1) de suelos en celdas y fuera de estas previo a su tratamiento y marco geológico ambiental en Acatzingo, Puebla.*

- , (2003). *Diagnóstico de la contaminación por hidrocarburos en diez áreas en instalaciones del Sector Torreón de PEMEX Gas y Petroquímica Básica.*
- IMTA, (2000).- *Banco de datos histórico nacional del SMN.* ERIC –II. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- INE, (2001). *Evaluación ambiental comparativa de dos sitios considerados para la ubicación del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM),* Julio de 2001. SEMARNAT. Estudio realizado por la UNAM.  
<http://www.ine.gob.mx/indexaero.html>
- INEGI, (1979). *Carta Aguas subterráneas,* Hojas: San Luis Potosí F 14-4, escala 1:250,000, México.
- , (1981). *Carta Aguas subterráneas,* Hojas: Querétaro F 14-10; Monterrey G 14-7; Mexicali I 11-12; Torreón G 13-9; Tlahualilo de Zaragoza G 13-6, escala 1:250,000, México.
- , (1982). *Carta Geológica,* Hojas: Guaymas G 12-2; San Luis Potosí F 14-4, escala 1:250,000, México.
- , (1983 a). *Carta Aguas subterráneas,* Hojas: Linares G 14-11; Ciudad de México E 14-2; Reynosa G 14-5; Orizaba E 14-6; Tizimín F 16-7; Pachuca F 14-11; Villahermosa E 15-8; Mazatlán F 13-1; Guaymas G 12-2, escala 1:250,000, México.
- , (1983 b). *Carta Geológica,* Hojas: Linares G 14-11; Cuernavaca E 14-5; Mexicali I 11-12; Ciudad de México E 14-2; Reynosa G 14-5; Orizaba E 14-6; Tizimín F 16-7; Campeche E 15-3; Pachuca F 14-11; Villahermosa E 15-8; Mazatlán F 13-1, escala 1:250,000, México.
- , (1984 a). *Carta Aguas subterráneas,* Hojas: La Paz G 12-10, escala 1:250,000, México.
- , (1984 b). *Carta Geológica,* Hojas: Minatitlán E 15-7; Oaxaca E 14-9; La Paz G 12-10, escala 1:250,000, México.
- , (1985 a). *Carta Aguas subterráneas,* Hojas: Cuernavaca E 14-5; Campeche E 15-3, escala 1:250,000, México.

- , (1985 b). *Carta Geológica*, Hojas: Tuxtla Gutiérrez E 15-11, escala 1:250,000, México.
- , (1988 a). *Carta Aguas subterráneas*, Hojas: Tuxtla Gutiérrez E 15-11; Salina Cruz E 15-10; Minatitlán E 15-7; Oaxaca E 14-9, escala 1:250,000, México.
- , (1988 b). *Carta Geológica*, Hojas: Monterrey G 14-7; Salina Cruz E 15-10; Guadalajara F 13-12; Torreón G 13-9; Tlahualilo de Zaragoza G 13-6; Hidalgo del Parral G 13-5, escala 1:250,000, México.
- , (1991). *Carta Aguas subterráneas*, Hojas: Hidalgo del Parral G 13-5, escala 1:250,000, México.
- , (1996). *Carta topográfica*, Hojas: Salina Cruz E 15-10; Tizimín F 16-7; San Luis Potosí F 14-4, escala 1:250,000, México.
- , (1997). *Carta topográfica*, Hojas: Querétaro F 14-10; Linares G 14-11; Tuxtla Gutiérrez E 15-11; Monterrey G 14-7; Cuernavaca E 14-5; Guadalajara F 13-12; Mexicali I 11-12; Ciudad de México E 14-2; Reynosa G 14-5; Campeche E 15-3; Oaxaca E 14-9; Villahermosa E 15-8; Mazatlán F 13-1; La Paz G 12-10; Guaymas G 12-2; Torreón G 13-9; Tlahualilo de Zaragoza G 13-6; Hidalgo del Parral G 13-5, escaa 1:250,000, México.
- , (1998 a). *Carta Geológica*, Hojas: Querétaro F 14-10, escala 1:250,000, México.
- , (1998) b. *Carta topográfica*, Hojas: Orizaba E 14-6; Minatitlán E 15-7; Pachuca F 14-11, escala 1:250,000, México.
- , (1999). *Carta Aguas subterráneas*, Hojas: Guadalajara F 13-12, escala 1:250,000, México.
- , (2000). *XII Censo General de Poblacional y vivienda del 2000*, Sistema Municipal de Base de Datos (SIMBAD). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.  
[http://www.inegi.gob.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/simbad/default.asp?c=73#](http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/simbad/default.asp?c=73#)

Johnson, D. E., (2000). *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. Edición en español, traducida del libro Applied Multivariate Methods for Data Analysis*. Ed. Internacional Thomson Editores, S.A. de C.V.

- Juárez, B. E. y Rico, R.A., (1992). *Mecánica de suelos*. Tomo 1, Fundamentos de la mecánica de suelos. 3ª. Edición, Editorial LIMUSA, Noriega Editores, México, D.F..
- Krebs, J. C., (1985). *Ecología, Estudio de la Distribución y Abundancia*. Segunda Edición., HARLA, S.A. de C.V., México. Autorizada en español de la obra en inglés.
- Lugo, H. J, (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F..
- , (1989). *Diccionario Geomorfológico, con equivalentes de los términos de uso más común en alemán, francés, inglés y ruso*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F..
- Malczewski. J.. (1999). *GIS and Multicriteria Decitio Analysis*. Department of Geography, University of Western Ontario, Canada. Ed. John Wiley & Sons. Inc. 81-100 pp.
- Marrero, M. M. y Petersson R. M., (2001). *Aplicación de las técnicas multicriterio en la evaluación de alternativas de solución a un problema medio ambiental. Un caso de estudio*. Universidad de Matanzas, Cuba.
- Martínez, E. y Escudey, M., (1998). *Evaluación y decisión Multicriterio; reflexiones y experiencias*. Chile; Universidad de Santiago, UNESCO, Institute for Statistics. <http://www.unesco.org/uy/st-policy/publicaciones/multicriterio.html>
- Melo, G. C., (2002). *Áreas Naturales Protegidas de México en el siglo XX*. Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Monterde, D. R., García, M. M., Aragonés B. Pastor F. J. P.. *Aplicabilidad de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process), en el análisis de factores de entorno en el diseño de productos industriales*. Grupo de investigación Teoría y Aplicación del proyecto. Departamento de Proyectos de Ingeniería, Innovación, Desarrollo y Diseño Industrial y Rural. Universidad Politécnica de Valencia, España. <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BF02.htm#subir>
- Ochoa, V. J., (1995). *Sistemas de información para estudios ecológicos de la industria petrolera*. Tesis de maestría. Centro Nacional de Cálculo, Sección de Graduados, IPN, México, D.F.

- Ortega, V. J., (2000). *Los horizontes de la geografía; Teoría de la Geografía*. Editorial Ariel, S.A., Barcelona, España.
- PEMEX, (1998). *Manual de especificaciones*. Realizado por PEMEX – Refinación. (Combustóleo, Diáfano, Diesel, Gasavión, Gasolinas y Turbosina).
- , (1999). *Informe 1999: Seguridad, Salud y Medio Ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental. México.  
<http://www.pemex.gob.mx/files/pdf/rpyden2.pdf>
- , (2000). *Informe de Seguridad y Medio Ambiente 2000. Derrames de hidrocarburos y residuos peligrosos*.  
<http://www.pemex.gob.mx/index.cfm/action/content/sectionID/9/catID/22/index.cfm?action=content&sectionID=9&catID=22>
- , (2001). *Informe de Seguridad, Salud y Medio Ambiente 2001. Derrames de hidrocarburos*. [http://www.pemex.gob.mx/files/pdf/derrames\\_fugas\\_01\\_amb.pdf](http://www.pemex.gob.mx/files/pdf/derrames_fugas_01_amb.pdf)
- , (2002). *Informe de Seguridad y Medio Ambiente 2002. Derrames y fugas hidrocarburos*. <http://www.pemex.gob.mx/files/seguridad/Proteccionambiental.pdf>
- , (2003). *Informe de mayo del 2003, atención a Sitios Afectados en Subgerencia de Ductos*. Expediente ASIPA – 1171/03. Gerencia de Protección Ambiental y Salud Ocupacional.
- Pilar, Jorge V., (2000). *Modelo matemático de apoyo a la decisión aplicado al proceso de otorgamiento de becas en las facultades de la Universidad Nacional de Nordeste (UNNE)*. Comunicaciones científicas y tecnológicas. Chaco- Argentina. [http://www.unne.edu.ar/cyt/2000/7\\_tecnologicas/t\\_pdf/t\\_054.pdf](http://www.unne.edu.ar/cyt/2000/7_tecnologicas/t_pdf/t_054.pdf)
- PROFEPA, (1999). *Restauración de Suelos Contaminados. Memorias del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados*. Pagina web. México.
- , (2001). *Problemática de emergencias ambientales asociadas con instalaciones de PEMEX*. Subprocuraduría de Auditoría Ambiental, Dirección General de Auditoría del Riesgo Ambiental y Prevención de Accidentes.
- Saaty, T. L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process. Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Mc Graw-Hill, USA.



Saval, B. S. (1995). Acciones para le Remediación de Suelos en México. Segundo Mini - simposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.

SEMARNAP, (1996). *Decreto que reforma, adiciona y deroga diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA)*, Diario Oficial de la Federación (DOF) 13 de diciembre de 1996, México.

SEMARNAP, (1997). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Delitos Ambientales*. Segunda edición, impreso por Comunicación Meridiana, S.A. de C.V., México.

SEMARNAT, (2000). *Inventario Nacional Forestal Periódico*. Realizado en colaboración con el Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F..

-----, (2001). *Programa Nacional del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Capítulo 2. <http://www.semarnat.gob.mx/comunicacionsocial/informe2.shtml>

-----, (2002). *NOM-EM-138-ecol-2002. Norma Oficial Mexicana de emergencia "Límites máximos permisibles de contaminación en suelos por hidrocarburos, caracterización del sitio y procedimientos para la restauración."* Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de agosto del 2002, lá cual fue prorrogada por seis meses más, el 20 de febrero de 2003.

-----, (2003). *Presentación de 21 de mayo, al Pleno del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COMARNAT), del Anteproyecto de NOM-138-ECOL-2003 Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y especificaciones para su caracterización y restauración*. México D. F.

Thill. J. C. (1999). *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis (A geography Information Sciences Approach (Introduction))*, Ed. Ashgate Publishing LTD. Gower House, Aldershot, England. 3-10 pp.

Yamane, T., (1979). *Estadística*. Versión autorizada en español de la obra en inglés titulada "Statistics: an introductory análisis. Editorial HARLA, S.A. de C.V., México, D.F.

## **Notas encontradas en la InterNet**

### **Áreas Naturales Protegidas por estado.**

[http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/cmd/cs/ce/155/s/4696/s\\_155/4691](http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/cmd/cs/ce/155/s/4696/s_155/4691)

### **Cálculos de la inconsistencia o consistencia. J. Ponce, G. Solis y L. Ulfe**

<http://www.lista-ioper.rcp.net.pe/Calculos-AHP.PDF>

### **Crudos mexicanos**

<http://www.iie.org.mx/publica/bolmj98/secmj98.htm>

### **Díaz, 1988. Proceso de jerarquización analítica. Asociación Venezolana de Logística (AVELOG). Valencia Estado de Carabobo, Venezuela**

<http://www.avelog.org/proceso.doc>

### **Diesel propiedades**

<http://www.franquiciapemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>

### **Gas natural en México, explosividades**

[http://www.conae.gob.mx/work/secciones/1759/imagenes/Gas\\_Natural\\_Mexico.pdf](http://www.conae.gob.mx/work/secciones/1759/imagenes/Gas_Natural_Mexico.pdf)

### **Presentación del Proceso Jerárquico Analítico (PJA). J. Ponce, G. Solis y L. Ulfe.**

<http://www.lista-ioper.rcp.net.pe/AHP.PDF>

### **Programa de prospectiva tecnológica para Latinoamérica y el caribe, manual de metodologías, tomo V: la técnica AHP**

<http://www foresight.ics.trieste.it/Library/library/5/TOMOV.doc>

### **Vehículos con etanol ficha técnica**

<http://www.conae.gob.mx/work/secciones/466/imagenes/vehiculoetanol.pdf>

## **Anexo 1**

### ***Formato del cuestionario “Opinión de Expertos”***

## **Instrucciones de llenado del cuestionario “Opinión de Experto” para la identificación y selección de parámetros o criterios de evaluación**

Proyecto de Tesis: Desarrollo y aplicación de un procedimiento para la jerarquización de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos.

El presente tiene por objeto identificar y seleccionar los parámetros (criterios de decisión) más importantes, para la jerarquización y priorización en cuanto a la atención, de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos. Dichos parámetros, serán utilizados en la aplicación del método de Toma de Decisiones con base en Multicriterios (MCDM, siglas en ingles), utilizando para este fin procesos de análisis jerárquico.

Los parámetros o criterios de decisión en este caso serán exclusivamente dentro de los rubros Social y Ambiental. Por cada parámetro que se indique se solicita dar una breve explicación del ¿Por qué? se considera importante ese parámetro, pensando que estamos hablando de contaminación del suelo por hidrocarburos.

Un ejemplo sería. Parámetro Ambiental: precipitación pluvial; la explicación u opinión sería: si el sitio contaminado se encuentra en un lugar donde llueva mucho, existe la probabilidad de que la contaminación (hidrocarburos), se extiendan a una mayor área o a una mayor profundidad. Por lo que la prioridad de atender ese sitio (diagnosticar y restaurar), sería mayor a mayor precipitación pluvial.

El cuestionario consta de tres partes: la primer parte se destina para proporcionar los datos generales del entrevistado; la segunda, será para dar su opinión, en relación a los parámetros enlistados (previamente seleccionados), ¿Cuáles de estos considera importantes y cuales no? (opcional); y por último la parte

considerada como medular, en la que cada entrevistado sugerirá algunos otros parámetro y verterá su opinión de experto del ¿por qué? considera que son importantes para la jerarquización y priorización de sitios con suelos contaminados por hidrocarburos.

No hay límite en cuanto al número de parámetros (criterios de decisión) que puedas incluir en el presente cuestionario, pero no olvidar que por cada parámetro tendrás que incluir tu opinión de experto del ¿Por qué? es importante ese parámetro.

A continuación se presenta el formato del cuestionario:

## **Cuestionario “opinión de experto” para la identificación y Selección de parámetros (criterios de evaluación).**

### **1. Datos Generales:**

Nombre completo:

Profesión:

Semestre de posgrado (sólo para estudiantes):

Puesto:

Correo electrónico:

Teléfono:

### **2. Opinión sobre parámetros o criterios preseleccionados**

Consideras importante los siguientes parámetros o criterios de decisión para la priorización en cuanto a la atención (evaluación y restauración) de sitios contaminados con hidrocarburos.

#### **Parámetros o criterios ambientales.**

- Tipos de contaminantes (Gasolinas, Diesel, Crudo, etc.)
- Usos del suelo (Urbano, Industrial, Agrícola, etc.)
- Tipo de vegetación (Bosque, Selva, Xerófila, etc.)
- Hidrología superficial (Ríos, lagos, lagunas, etc.)
- Aguas subterráneas (Existencia y Profundidad)
- Presencia o cercanía Áreas Naturales Protegidas
- Riesgo geológico Ambiental (tipos de rocas, fracturas o fallas, etc.)

#### **Parámetros o criterios sociales.**

- Cercanías a poblados
- Cercanías a zonas agrícolas
- Cercanías a ciudades importantes
- Grupos vulnerables (niños, ancianos, mujeres, etc.)
- Servicios (Agua entubada, Drenaje, etc.).

**Explica tu respuesta:**

**3.- Parámetros sugeridos por el entrevistado.**

<b>Parámetros Ambientales</b>	<b>Parámetros Sociales</b>

Da tu opinión de experto, explica la importancia de cada parámetro sugerido anteriormente.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Si tienes dudas, favor de enviarlas al siguiente correo electrónico: [smendez@imp.mx](mailto:smendez@imp.mx) o aquí mismo en la clase de Seminario de Tesis I.  
Por tu valioso apoyo, muchas gracias.  
Atentamente  
Sergio Fco. Méndez Velarde.