



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN
CAVIDADES GEOLÓGICAMENTE ESTABLES**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

P R E S E N T A :

ING. CHRISTIAN EDUARDO HERNÁNDEZ MENDOZA



TUTOR:
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F.,

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Silke Cram Heydrich
Secretario: M. en Adm. Ind. Landy Irene Ramírez Burgos
Vocal: Dr. Salvador Marín Córdova
1^{er}. Suplente: Dra. Georgina Fernández Villagómez
2^{do}. Suplente: Dra. Rosario Iturbe Argüelles

Lugar donde se realizó la tesis:
Facultad de Ingeniería, División de Ingenierías Civil y Geomática, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Georgina Fernández Villagómez

FIRMA

Agradecimientos

Con estas líneas quiero agradecer a todas las personas que tan amable y desinteresadamente me apoyaron para alcanzar esta meta que me planteé desde el término de mi formación como ingeniero civil.

Igualmente quiero agradecerles a todas las personas y amigos que confiaron en mí y que me apoyaron en los momentos más difíciles en esta etapa de mi vida.

Sobre todo quiero agradecerle a mi familia, la cual siempre ha estado conmigo, de quienes siempre he tenido su cariño y comprensión, sin importar el tiempo que he tenido que sacrificar con ellos por tener que dedicarme completamente a realizar mis estudios.

No tengo palabras para agradecerle a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi *alma mater*, por darme todo el conocimiento científico que tengo, así como todas aquellas experiencias que me han hecho crecer como ser humano y como profesionista comprometido con mi país.

También le agradezco a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por darme la oportunidad de desarrollarme como parte del personal docente de ésta noble y gran institución.

Así mismo le agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo que me brindó para llevar a cabo esta meta.

Nada puede usurpar el sitio que corresponde a la persistencia. No el talento: muchos hombres de talento son unos fracasados. Ni el ingenio... pues muchos genios son unos vagos. Solo la decisión y la persistencia son omnipotentes. "Empeñarse en algo" es lo que resuelve y siempre resolverá los problemas de la humanidad.

Calvin Coolidge

Ningún conocimiento nos ayudará si hemos perdido la capacidad de conmovernos con la desgracia de otro ser humano, con la mirada amistosa de otra persona, con el canto de un pájaro, con el verdor del césped. Si el hombre se hace indiferente a la vida, no hay ninguna esperanza de que pueda elegir el bien.

Erich Fromm "El corazón del hombre"

Estas tres señales distinguen al hombre superior: La virtud, que lo libra de la ansiedad; la sabiduría, que lo libra de la duda; y el valor, que lo libra del miedo.

Kung FuTse, Confucio

Cuando el pueblo es tan numeroso, ¿Qué puede hacerse en su bien? Hacerlo rico y feliz. Y cuando sea rico ¿Qué más puede hacerse por él? Educarlo.

Kung FuTse, Confucio

Tan solo por la educación puede el hombre llegar a ser hombre; el hombre no es mas que lo que la educación hace de él.

Immanuel Kant

Lo poco que he aprendido carece de valor, comparado con lo que ignoro y no desespero en aprender.

René Descartes

Si he visto más lejos ha sido porque he subido a hombros de gigantes.

Sir Isaac Newton

ÍNDICE

	Página.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
RÉSUMÉ	3
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
INTRODUCCIÓN	5
I GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA UNIÓN EUROPEA Y EN MÉXICO	
1.1 GENERALIDADES	8
1.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA UNIÓN EUROPEA	9
1.2.1 Clasificación de las actividades económicas europeas	9
1.2.2 Datos disponibles de los estados miembros de la Unión Europea	9
1.2.3 Europa Central	9
1.2.4 Europa del Norte	11
1.2.5 Europa del Sur	13
1.2.6 Europa del Este	14
1.2.7 Europa del Oeste	15
1.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN MÉXICO	15
1.3.1 Distribución geográfica de la generación de residuos industriales peligrosos en México	19
1.3.2 Infraestructura para el manejo de los residuos peligrosos en México	19

II	MARCO LEGAL NACIONAL E INTERNACIONAL EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS	
2.1	CRITERIOS EMPLEADOS EN EL MUNDO PARA CLASIFICAR UN RESIDUO COMO PELIGROSO	22
2.1.1	Criterios aplicados en Estados Unidos de Norteamérica	22
2.1.2	Criterios aplicados en Brasil	23
2.1.3	Criterios aplicados en Europa	24
2.2	CRITERIOS EMPLEADOS EN MÉXICO PARA CLASIFICAR UN RESIDUO COMO PELIGROSO	25
2.3	MARCO LEGAL EN MATERIA AMBIENTAL SOBRE EL MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS EN MÉXICO	26
2.4	CRITERIOS INTERNACIONALES PARA LA SELECCIÓN DE DOMOS SALINOS PARA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS	30
2.5	CRITERIOS MEXICANOS PARA LA SELECCIÓN DE DOMOS SALINOS PARA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS	34
III	LOS DOMOS SALINOS	
3.1	GENERALIDADES SOBRE LOS DOMOS SALINOS	37
3.2	ORIGEN DE LOS DOMOS SALINOS	38
3.3	TAMAÑO, FORMA Y COMPOSICIÓN DE LOS DOMOS SALINOS	42
3.4	USOS DE LAS CAVIDADES SALINAS	44
3.4.1	Primeros usos de las cavidades salinas	44
3.4.2	Usos comunes de las cavidades salinas	45
3.4.3	Usos poco comunes de las cavidades salinas	47
3.5	ACCIDENTES RELACIONADOS CON EL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN CAVIDADES SALINAS	48
3.6	CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO DE LA CAVIDAD	50
3.7	COSTOS DE DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS	51
3.7.1	Costos de disposición fuera del sitio de generación del residuo peligroso	52

IV	DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO PELIGROSO A CONFINAR	
4.1	GEOLOGÍA Y COMPOSICIÓN DEL PETRÓLEO	53
4.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO CRUDO	55
4.3	CARACTERÍSTICAS DE ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD	58
4.4	CARACTERÍSTICAS DE TOXICIDAD	58
4.5	ORIGEN DE LOS ELEMENTOS EXTRAÑOS EN LA COMPOSICIÓN DE LOS HIDROCARBUROS	60
4.5.1	Azufre	60
4.5.2	Nitrógeno	60
4.5.3	Oxígeno	61
4.5.4	Sustancias misceláneas	61
4.5.5	Anhídrido carbónico	61
4.5.6	Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico	62
V	EVALUACIÓN DE LOS SITIOS PARA LA DISPOSICIÓN DEL RESIDUO PELIGROSO SELECCIONADO	
5.1	GENERALIDADES SOBRE EL PROCESO DE SELECCIÓN	63
5.2	DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA SELECCIONAR EL SITIO DE DISPOSICIÓN	64
5.2.1	Características geológicas	64
5.2.1.1	Rocas ígneas	66
5.2.1.2	Rocas metamórficas	67
5.2.1.3	Rocas sedimentarias	67
5.2.1.4	Índice de calidad de roca	68
5.2.2	Características hidrológicas	69
5.2.2.1	Hidrología superficial	70
5.2.2.2	Hidrología subterránea	72
5.2.3	Características climatológicas	73
5.2.4	Aspectos ecológicos	76
5.2.5	Características sísmicas	76
5.2.6	Crecimiento de centros urbanos y opinión pública	79
5.2.7	Accesibilidad	80
5.3	ANÁLISIS DE LOS SITIOS POTENCIALES PARA LA DISPOSICIÓN DEL RESIDUO PELIGROSO	80
5.3.1	Ubicación geográfica	80
5.3.2	Fisiografía	81
5.3.3	Orografía	86
5.3.4	Suelo	87
5.3.5	Características geológicas	92
5.3.6	Hidrología	96
5.3.7	Climatología	100
5.3.8	Aspectos ecológicos	108
5.3.9	Agricultura y vegetación	111
5.3.10	Características sísmicas	114

5.3.11	Crecimiento de centros urbanos	117
5.3.12	Accesibilidad	118
VI	RESULTADOS	
6.1	ZONAS CON PRESENCIA DE DOMOS SALINOS EN MÉXICO	121
6.2	EL ISTMO DE TEHUANTEPEC	124
6.2.1	Geografía física	124
6.2.2	Relieve	124
6.2.3	Climatología	124
6.2.4	Hidrología	125
6.2.5	Demografía	127
6.2.6	Economía	127
6.2.7	Transportes	127
6.2.8	Geología	129
6.3	ZONA CON POTENCIAL PARA CONFINAR RESIDUOS PELIGROSOS EN CAVIDADES GEOLÓGICAMENTE ESTABLES	134
VII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

ÍNDICE DE TABLAS.

		Página.
Tabla 1.1	Perspectiva de la información proporcionada para el estudio	10
Tabla 2.1	Factores de exclusión recomendados por la OMS para la selección de sitios orientados al manejo de residuos peligrosos	31
Tabla 2.2	Criterios de la MMBV para la ubicación de sitios adecuados para establecer infraestructura para el manejo de residuos peligrosos	32
Tabla 2.3	Factores para definir la ubicación de los sitios de confinamiento de residuos peligrosos en Estados Unidos de Norteamérica	33
Tabla 2.4	Distancias de separación entre instalaciones residenciales y públicas a los sitios para disposición de residuos peligrosos en Estados Unidos de Norteamérica y Canadá	34
Tabla 3.1	Almacenamientos existentes en cavidades salinas	46
Tabla 3.2	Costos de disposición de residuos petroleros	52
Tabla 5.1	El RQD y la calidad de la roca	69
Tabla 5.2	Escala de intensidad Mercalli-Modificada abreviada	77
Tabla 5.3	Provincias y subprovincias fisiográficas de Veracruz	84
Tabla 5.4	Principales elevaciones del estado de Veracruz	86
Tabla 5.5	Tipos de suelo presentes en el estado de Veracruz	88
Tabla 5.6	Geología del estado de Veracruz	94
Tabla 5.7	Regiones y cuencas hidrológicas del estado de Veracruz	97
Tabla 5.8	Corrientes de agua del estado de Veracruz	97
Tabla 5.9	Cuerpos de agua del estado de Veracruz	98
Tabla 5.10	Climas presentes en el estado de Veracruz	101
Tabla 5.11	Precipitación total anual en el estado de Veracruz	105
Tabla 5.12	Áreas Naturales Protegidas de control federal por denominación, al 31 de diciembre de 2004	108
Tabla 5.13	Áreas Naturales Protegidas de control estatal por denominación, al 31 de diciembre de 2004	109
Tabla 5.14	Flora y fauna presentes en el estado de Veracruz	111
Tabla 5.15	Agricultura y vegetación desarrolladas en Veracruz	113

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Página.	
Figura 1.1	Generación de residuos peligrosos en Europa Central	11
Figura 1.2	Generación de residuos peligrosos en Europa del Norte	12
Figura 1.3	Generación de residuos peligrosos en Europa del Sur	13
Figura 1.4	Generación de residuos peligrosos en Europa del Este	14
Figura 1.5	Generación de residuos peligrosos en Europa del Oeste	15
Figura 1.6	Cantidad de empresas que manifiestan la generación de residuos peligrosos	17
Figura 1.7	Generación de residuos peligrosos por entidad federativa para los años de 1999 y 2000	18
Figura 1.8	Distribución porcentual de la generación de residuos peligrosos por entidad federativa durante el año 2000	18
Figura 1.9	Evolución de la infraestructura de reuso, reciclado, tratamiento, incineración y confinamiento de residuos peligrosos de 1993 a 1999	19
Figura 1.10	Empresas autorizadas para el manejo de residuos industriales peligrosos	20
Figura 1.11	Infraestructura autorizada para el acopio y transporte de residuos peligrosos en el 2000	20
Figura 3.1	Domo salino y recursos naturales valiosos asociados	37
Figura 3.2	Principales depósitos de sal y sitios de producción de sal en Canadá, Norteamérica y México	39
Figura 3.3	Evolución de un diapiro de sal	40
Figura 3.4	Sección transversal y curvas de nivel de un domo salino	40
Figura 3.5	Cavernas de minería de solución	41
Figura 3.6	Tipos de domos salinos	42
Figura 3.7	Vista aérea de la zona de domos salinos Leaf-Hill	43
Figura 3.8	Secciones comunes de los domos salinos	43
Figura 3.9	Efectos de la deformación progresiva en las cavernas de Eminence, Kiel y Tersanne	50
Figura 5.1	Ciclo de las rocas	64
Figura 5.2	Clasificación de las rocas	65
Figura 5.3	Rasgos geológicos de México	66
Figura 5.4	Ciclo hidrológico	69
Figura 5.5	Zonas de peligros por inundaciones en la República Mexicana	70
Figura 5.6	Elementos de una cuenca y tipos de cuencas	71
Figura 5.7	Zonificación de velocidades máximas en la República Mexicana basada en datos de la Comisión Federal de Electricidad	74

Figura 5.8	Zonificación de la precipitación media anual	75
Figura 5.9	Principales placas generadoras de movimientos sísmicos en el país	76
Figura 5.10	Mapa de intensidades de los sismos ocurridos entre 1845 y 1985 en México	78
Figura 5.11	Epicentros de sismos de gran magnitud ($M \geq 7$) ocurridos durante el siglo XX en México	78
Figura 5.12	Regionalización Sísmica de México	79
Figura 5.13	Ubicación geográfica del estado de Veracruz, México	80
Figura 5.14	Ubicación geográfica de las diez regiones del estado de Veracruz, México	81
Figura 5.15	Mapa de las elevaciones principales en el estado de Veracruz	85
Figura 5.16	Mapa de las elevaciones principales en el estado de Veracruz	87
Figura 5.17	Distribución espacial de los tipos de suelo en el estado de Veracruz	89
Figura 5.18	Mapa de uso potencial agrícola del suelo en el estado de Veracruz	91
Figura 5.19	Mapa de uso potencial pecuario del suelo en el estado de Veracruz	92
Figura 5.20	Características geológicas del estado de Veracruz	95
Figura 5.21	Mapa geológico del estado de Veracruz	96
Figura 5.22	Mapa de regiones hidrológicas de Veracruz	98
Figura 5.23	Corrientes y cuerpos de agua del estado de Veracruz	99
Figura 5.24	Principales ríos de Veracruz	100
Figura 5.25	Distribución de los diversos climas en el estado de Veracruz	102
Figura 5.26	Isotermas del estado de Veracruz	103
Figura 5.27	Distribución de la precipitación mensual en el estado de Veracruz	105
Figura 5.28	Mapa de precipitación promedio anual en el estado de Veracruz	106
Figura 5.29	Isoyetas del estado de Veracruz	107
Figura 5.30	Mapa de peligros por incidencia de ciclones	108
Figura 5.31	Áreas Naturales Protegidas en el estado de Veracruz	110
Figura 5.32	Distribución de la vegetación y agricultura en el estado de Veracruz	114
Figura 5.33	Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 10 años	115
Figura 5.34	Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 50 años	115
Figura 5.35	Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 100 años	116
Figura 5.36	Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 500 años	116
Figura 5.37	Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 1 000 años	117
Figura 5.38	Mapa de las principales vías terrestres en el estado de Veracruz	119
Figura 5.39	Mapa de las principales vías de comunicación en el estado de Veracruz	120
Figura 6.1	Zonas con presencia de grandes estructuras salinas	121
Figura 6.2	Estructuras y domos salinos en el Istmo de Tehuantepec	122
Figura 6.3	Estructuras salinas en la Faja de Oro y Poza Rica, Veracruz	123
Figura 6.5	Relieve del Istmo de Tehuantepec	125
Figura 6.6	Hidrología del Istmo de Tehuantepec	126

Figura 6.7	Sistemas de transporte en el Istmo de Tehuantepec	128
Figura 6.8	Estructura y curvas de nivel del domo salino Zanapa	130
Figura 6.9	Secciones del casquete de los domos salinos Jaltipan y Amexquita	131
Figura 6.10	Campo de domos salino El Plan	132
Figura 6.11	Campo de domos salinos La Venta	133

RESUMEN

A nivel mundial se generan alrededor de 400 millones de toneladas anuales de residuos peligrosos, de los cuales cerca del 80% se generan en los países industrializados, de esa proporción se exporta el 10% en gran parte a los países subdesarrollados con grandes necesidades económicas. La generación de residuos peligrosos a nivel mundial presenta una clara tendencia a aumentar, a esto se le debe sumar el hecho de que solo un bajo porcentaje de éstos reciben algún tratamiento adecuado para su estabilización, además de que la infraestructura para su disposición final no es suficiente para satisfacer la demanda existente.

En México la producción anual de residuos peligrosos certificada por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, de más de 3,7 millones de toneladas anuales, de las cuales más del 90% no recibe ningún tratamiento adecuado para su disposición final. Por lo que respecta a los riesgos generados por la industria petroquímica mexicana, la cual produce la mayor cantidad de sustancias altamente cancerígenas y contaminantes del país, se sabe que Petróleos Mexicanos (PEMEX) genera 558 mil 141 toneladas anuales de estos contaminantes, de las cuales la industria petroquímica genera 63,5% y las refinerías el 36,5% restante. Debe remarcar el hecho de que el único confinamiento controlado y autorizado en México, para la disposición final de residuos peligrosos, es el ubicado en la localidad de Mina, en el estado de Nuevo León, el cual está próximo a llegar al final de su vida útil. De igual manera debe notarse que la generación de residuos peligrosos en México se ha triplicado en un periodo de 10 años, mientras que la infraestructura para su manejo adecuado no se incrementó de manera importante durante dicho lapso.

Así en este trabajo se analiza la posibilidad de emplear a los domos salinos, ubicados en la cuenca salina del estado de Veracruz, México, como un sistema técnica y económicamente factible para la disposición final de los residuos líquidos peligrosos de la industria petrolera mexicana. A partir de dicho análisis se obtuvo que el costo de disponer una tonelada de este tipo de residuos en un domo salino, es de aproximadamente un tercio del costo de disponerlo en una instalación superficial, además de que los impactos al ambiente y al hombre son mínimos, debido a que este tipo de estructuras geológicas puede proporcionar un confinamiento seguro de dichos residuos durante un lapso de 10 mil años, con una probabilidad de falla estimada de 1 en 1 millón a 1 en 10 millones de millones (1 : 1 000 000 a 1 : 10 000 000 000 000).

De esta forma, después de realizar una amplia investigación sobre el tema, se concluye que es factible la disposición de los residuos peligrosos de la industria petrolera mexicana, en cavidades construidas por disolución en domos salinos, como sistema de disposición controlada y ambientalmente amigable.

ABSTRACT

The hazardous waste generated worldwide is about 400 million tons per year, approximately 80% of which is generated in industrialized countries, and 10% out of this quantity is exported to underdeveloped countries with big economic needs. The generation of hazardous waste worldwide presents a clear trend to increase. Furthermore, only a low percentage of the waste receives adequate treatment for its stabilization, not to mention that the infrastructure for its final disposition is not sufficient to satisfy the existing demand.

In Mexico it is estimated that the annual production of hazardous waste, according to figures provided by the Secretariat of the Environment and Natural Resources (SEMARNAT), is more than 3,7 million tons per year, more than 90% of which does not receive any adequate treatment for its final disposition. As for the risks related to the Mexican petrochemical industry, which produces the major quantity of highly carcinogenic substances and pollutants of Mexico, it is known that Petróleos Mexicanos (PEMEX), the Mexico's state-owned, nationalized petroleum company, generates 558 thousand 141 tons of these pollutants per year, 63,5% being generated by the petrochemical sector whereas 36,5% by the refineries. It must be noticed that the only controlled authorized confinement for the final disposition of hazardous waste in Mexico is the one located in Mina, a town in the state of Nuevo León, and which is approaching to the end of its useful life. Likewise, it must be noticed that the generation of hazardous waste in Mexico has tripled in a 10-year period, whereas the infrastructure for its suitable managing has not significantly increased over the same period.

The objective of this work is the analysis of salt domes located in the salt basin of the state of Veracruz, Mexico, as a technically and economically feasible system for the final disposition of liquid hazardous waste of the Mexican oil industry. In this study the cost of arranging one ton of that kind of waste into a salt dome in Mexico was obtained. Such cost is approximately one third of the cost of arranging it in a superficial installation. What is more, the impact on both the environment and humans is minimal due to the fact that this type of geological structures can provide us with a safe confinement of such waste during a lapse of 10 thousand years, with a estimated probability of fault from 1 in 1 million to 1 in 10 million millions (1: 1 000 000 to 1: 10 000 000 000 000).

This way, the use of cavities constructed by solution mining into salt domes as system of controlled disposition and environmentally amicably has been proved feasible in this study.

RÉSUMÉ

Au niveau mondial on génère autour de 400 millions de tonnes de déchets dangereux par an, dont presque 80% sont produits par les pays industrialisés, et 10% de cette quantité sont exporté en grande partie dans les pays sous-développés avec de grandes nécessités économiques. La production de déchets dangereux au niveau mondial présente une claire tendance à augmenter. À cela il faut additionner le fait qu'un bas pourcentage de celle-ci reçoit un traitement approprié à sa stabilisation, de plus l'infrastructure de sa disposition finale n'est pas suffisante pour satisfaire la demande existante.

Au Mexique, on estime que la production annuelle de déchets dangereux recommandée par le Secrétaire de l'Environnement et des Ressources Naturelles (SEMARNAT), est de plus de 3,7 millions de tonnes par an, desquelles plus de 90% ne reçoivent pas de traitement approprié à sa disposition finale. L'industrie pétrochimique mexicaine est celle qui produit la plus grande quantité de substances hautement cancérigènes et polluantes au Mexique. Il est connu que « Petróleos Mexicanos » (PEMEX), l'entreprise publique mexicaine chargée de l'exploitation du pétrole, émet 558 mille 141 tonnes par an de ses polluants, desquelles l'industrie pétrochimique engendre le 63,5% et les raffineries le 36,5% restants. On doit remarquer le fait qu'il existe seulement un site de disposition final de déchets dangereux au Mexique. Ce même site est situé au village «Mina», dans l'État de « Nuevo León », qui en est maintenant à ses derniers moments de vie utile. Du même fait, on doit remarquer que la production de déchets dangereux au Mexique a triplé en une période de 10 ans, alors que l'infrastructure pour son maniement n'a pas augmenté d'une manière importante durant cette même période.

D'après cette investigation, on analyse la possibilité d'employer des dômes salins, situés dans des bassins de sel dans l'État de Veracruz, au Mexique, comme un système technique et économiquement faisable pour la disposition finale des déchets liquides dangereux de l'industrie pétrolière mexicaine. À partir de cette analyse, on conclut que le prix pour disposer une tonne de ce type de déchets dans un dôme salin, est d'à peu près le tiers du prix pour le disposer dans une installation superficielle. En plus, les impacts à l'environnement et à l'homme sont minimisés grâce à cette structure géologique qui peut offrir un entreposage sûr de ces mêmes déchets durant un laps de 10 mille ans, avec une probabilité de faille estimée de 1 dans 1 million à 1 dans 10 millions de millions (1 : 1 000 000 à 1 : 10 000 000 000).

Enfin, après avoir réalisé une ample recherche sur le sujet, on conclut qu'il est faisable de disposer les déchets dangereux de l'industrie pétrolière mexicaine, dans les cavités des dômes salin qui sont construites par la dissolution, comme un système de disposition contrôlé et écologiquement amiable.

OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la factibilidad de la disposición de residuos peligrosos en cavidades geológicamente estables considerando las formaciones salinas ubicadas en México.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la generación de residuos peligrosos en la Unión Europea y en México a partir de la normatividad vigente.
- Comparar los criterios de clasificación de los residuos peligrosos generados en la Unión Europea y en México tomando en cuenta la NOM-052-SEMARNAT-2005 y la lista de residuos peligrosos europea.
- Investigar si el empleo de los domos salinos se encuentra normado a nivel nacional e internacional.
- Indicar si se tiene experiencia a nivel mundial y nacional en el empleo de estructuras geológicamente estables.
- Determinar los principales modos de falla de los domos salinos con base en la experiencia que se tiene acerca de su funcionamiento.
- Definir las principales zonas dentro de la República Mexicana en las que existan estructuras salinas estables tomando en cuenta la geología del país.
- Estimar los costos de disposición de residuos peligrosos líquidos en cavidades geológicamente estables, a partir de los datos reportados por las industrias petroleras de los Estados Unidos de Norteamérica.

INTRODUCCIÓN

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente define como residuo peligroso todo aquel desecho, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes, representa un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, define como residuo peligroso a aquellos que poseen características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes y embalajes, y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran, a otro sitio de conformidad con lo que establece esta Ley.

En México como en todo el mundo, la generación de residuos peligrosos ha despertado la preocupación de la población y de las autoridades, debido a los efectos tan adversos que éstos pueden generar sobre el hombre y su medio.

Los residuos peligrosos que no son manejados adecuadamente representan un importante desafío para el equilibrio ambiental y la salud humana, ya que en la gran mayoría de los casos acaban en los drenajes municipales, barrancas, tiraderos clandestinos a cielo abierto, o en cualquier otro lugar que no cuenta con las especificaciones técnicas necesarias.

El incontable número de problemas ambientales que existen en el mundo van desde algunos muy complejos, tales como el deterioro de la capa de ozono, el efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad, el deterioro de la calidad de los mantos freáticos, de las aguas superficiales y de los océanos, hasta aquellos que se han podido solucionar de manera “eficiente”.

A diferencia de lo que ocurre en la naturaleza, donde la mayoría de los productos biológicos se reciclan, las actividades que desarrolla la sociedad suelen ser ineficientes en cuanto al consumo de agua, energía y materiales, generando grandes cantidades de residuos que deben descartarse. Lo anterior ejerce presiones excesivas sobre la propia naturaleza, no sólo derivadas de la extracción de los recursos, sino también como consecuencia de su transformación en residuos que son vertidos irresponsablemente en los suelos y cuerpos de agua (SEMARNAT, 2002).

Es bien conocido que los países industrializados generan cantidades considerables de residuos peligrosos, cuyo reciclado es imposible ya sea por razones económicas o por razones técnicas, por lo cual durante muchos años han optado por exportarlos hacia los países tercermundistas cuyas regulaciones en materia ambiental son mucho menos estrictas, la necesidad de generación de riqueza es mayor y la preocupación por la salud de sus habitantes es mínima. Cabe mencionar que los países industrializados producen cerca del 80% de los 400 millones de toneladas generados anualmente en el mundo, y de esa proporción exportan el 10%, en su gran mayoría a países subdesarrollados con grandes necesidades económicas (CHOIKE, 2005).

Después de muchos problemas relacionados con el tráfico de residuos peligrosos acontecidos en los años ochentas, el 22 de marzo de 1989 en Basilea, Suiza, se creó un convenio cuya finalidad es controlar el traslado y desecho de aquellos residuos que por sus características fueran considerados como

peligrosos. Dicho convenio entró en vigor el día 5 de mayo de 1992, sin embargo éste era incapaz de prohibir efectivamente la exportación de residuos peligrosos a los países de economías en desarrollo, no obstante, debido a la presión ejercida por varios países y grupos ambientalistas, en el año de 1995 se implantó una enmienda al Convenio de Basilea, la cual prohíbe cualquier tipo de exportación de materiales contaminantes, prohibición que entraría en vigor sólo cuando dicha enmienda fuera ratificada por 62 de los países participantes del Convenio (para mayo de 2003 lo habían hecho 36 países), de los cuales Estados Unidos de Norteamérica se abstuvo de firmar. Como parte de un nuevo plan estratégico de 10 años del Convenio de Basilea, el 6 de mayo de 2003 se aprobó una serie de 15 proyectos diseñados para prevenir los embarques ilegales de desechos peligrosos y mejorar las condiciones de eliminación de éstos (*Op. Cit.*).

El problema de la tipificación de los diferentes residuos peligrosos está relacionado con la amplia diversidad de sistemas de clasificación de estos tipos de residuos en el mundo. Hasta el momento, la Unión Europea ha tratado de unificar los criterios de clasificación empleados entre sus países miembros; de esta forma ha emitido el Catalogo Europeo de Residuos y la Lista Europea de Residuos Peligrosos, lo que representa el mayor esfuerzo realizado hasta el momento con la finalidad de unificar dichos criterios.

Para el caso específico de México se tienen estimaciones que si se generan 7,5 millones de toneladas de desechos peligrosos al año, en el mismo lapso se producen 123 millones de toneladas de residuos mineros, casi 30 millones provenientes de la industria química y prácticamente 12 millones procedentes de la industria agroquímica. Estos 165 millones de toneladas adicionales no están consideradas como peligrosas, a pesar de no existir sustento para su exclusión. Aunado a lo anterior, nuestro país se ha quedado rezagado en lo relativo a tecnologías nuevas y más limpias para el manejo y confinamiento de los residuos peligrosos, orillando a varias empresas generadoras a hacer la disposición final de manera inadecuada.

De igual manera se tiene que la producción de residuos peligrosos se ha triplicado en un periodo de 10 años, esto sin considerar la generación de residuos peligrosos de aquellas empresas que operan de manera clandestina y que se encuentran fuera de control de las autoridades. En este mismo periodo de tiempo no se han incrementado de manera importante las instalaciones para su tratamiento y disposición final.

A nivel mundial se han buscado diversas soluciones para el problema de la disposición final de los residuos peligrosos, encontrando que el confinamiento de dichos residuos dentro de cavidades estables construidas por disolución dentro de los domos salinos proporciona una solución bastante confiable desde el punto de vista ambiental. A pesar de las dudas que se podría tener respecto a este tipo de confinamiento, se ha podido demostrar físicamente la confiabilidad del empleo de este tipo de estructuras como sitios de confinamiento final de los residuos peligrosos que no disuelven a la sal.

A continuación se presenta una tabla con la finalidad de proporcionar una comparación entre el confinamiento en celda y el confinamiento mediante inyección profunda, en la cual se muestra los principales contrastes entre ambos métodos de disposición final de residuos peligrosos.

Característica	Confinamiento en celda	Inyección profunda
Lixiviación	Factible	No
Emisiones a la atmósfera	Factible	No
Contacto con la biosfera	Factible	No
Riesgos en el transporte	Factible	Mínimo
Cierre del sitio	Costoso	Irrelevante
Huella ambiental	Extensa	Irrelevante
Vida útil	Limitado por el terreno	Límite geológico
Demanda de suelo	Incremental	Fija
Uso futuro del suelo	Limitado	Factible
Vigilancia y control	Complejo	Simple
Impacto social	Alto	Bajo
Tecnología	Tradicional	De punta

Recuperación de residuos	Posible	Muy bajo
--------------------------	---------	----------

De la tabla anterior se aprecia que el método de inyección profunda presenta grandes ventajas respecto al método de confinamiento de los residuos en celda, cabe destacar que éste último método es el que actualmente se emplea en el único sitio de confinamiento de residuos peligrosos en funcionamiento en México.

En este trabajo se analiza la posibilidad de confinar los residuos peligrosos líquidos contaminados con hidrocarburos, dentro de cavidades formadas por disolución de sal en el interior de los domos salinos ubicados en el país. Se sabe que México cuenta con tres formaciones salinas importantes ubicadas en los estados de Veracruz, Tamaulipas y Chihuahua. Para efectos de este estudio se analiza la posibilidad de desarrollar este tipo de confinamiento de residuos peligrosos, en la formación salina ubicada en el estado de Veracruz, ya que esta formación se encuentra cerca de los principales campos productores de hidrocarburos en México y de los principales mercados para este método de disposición final de dichos residuos peligrosos.

CAPITULO I. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA UNIÓN EUROPEA Y EN MÉXICO

1.1 GENERALIDADES

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés) y la Eurostat publican datos acerca de la generación de residuos peligrosos en los países miembros de la Unión Europea. De acuerdo a un estudio preparado por Brodersen *et al.* (2001) para la Agencia Ambiental Europea dichos datos son escasos y es difícil realizar comparaciones válidas entre los datos de los diferentes países. Además, las cantidades totales nacionales reportadas a la OECD y a la Eurostat en los cuestionarios bianuales comunes, generalmente están basadas en las clasificaciones y definiciones de cada país, lo cual dificulta realizar comparaciones válidas entre los datos de los diferentes países. Algunos países realizan sus reportes de acuerdo a sus clasificaciones nacionales, mientras que otros los reportan de acuerdo a la clasificación de la Convención de Basilea, o bien, de acuerdo a la Lista de Residuos Peligrosos (LRP).

La creación del Catálogo Europeo de Residuos (CER) y de la Lista de Residuos Peligrosos representa el avance más significativo hasta hoy, hacia la homogeneización de la información sobre la generación y el manejo de los residuos en Europa, y el desarrollo de un sistema de clasificación para los residuos peligrosos y no peligrosos comunes a toda Europa. El Catálogo Europeo de Residuos se implantó en diciembre de 1993 mediante la Decisión del Consejo 94/3/EC, mientras que la Lista de Residuos Peligrosos se implantó en diciembre de 1994 mediante la Decisión del Consejo 94/904/EC. La Lista de Residuos Peligrosos es un subconjunto del Catálogo Europeo de Residuos y constaba de 236 de los 645 tipos de residuos del Catálogo Europeo de Residuos, que fueron considerados por la Unión Europea por ser peligrosos en la época en que se generó dicha lista. El Catálogo Europeo de Residuos y la Lista de Residuos Peligrosos se corrigieron en junio y julio de 2001 y para cuando entraron en vigor en junio de 2002, el Catálogo Europeo de Residuos constaba de 849 códigos de los cuales 404 son considerados como residuos peligrosos. En general, el Catálogo Europeo de Residuos y la Lista de Residuos Peligrosos son listados de residuos basados en su origen y proceso (Brodersen *et al.*, 2001).

La implementación del Catálogo Europeo de Residuos y de la Lista de Residuos Peligrosos ha sido lenta. En algunos países europeos, el Catálogo Europeo de Residuos y la Lista de Residuos Peligrosos se han integrado completamente en la legislación nacional y en los sistemas de registro de datos; en otros países el Catálogo Europeo de Residuos y la Lista de Residuos Peligrosos se emplean como listados de referencia. Un problema mayor para muchos de los Estados Miembro ha sido la diferencia fundamental entre las listas de residuos basados en las sustancias y la propuesta, basada en la fuente-proceso, empleada por el Catálogo Europeo de Residuos y la Lista de Residuos Peligrosos; lo anterior se debe a que el mismo desecho puede aparecer varias veces en la Lista de Residuos Peligrosos, cuando se produce por varias fuentes. Cabe destacar que se puede obtener información valiosa de ambas clasificaciones, de la fuente-proceso y de la basada en las sustancias; el sistema de clasificación fuente-proceso es muy usado para propósitos de minimización de residuos y para el uso de tecnologías más limpias, así como para comparar los desechos de diferentes ramos, mientras que la clasificación orientada a las sustancias proporciona información acerca de las cantidades totales generadas, de cómo tratar los residuos una vez que estos se producen y de la capacidad necesaria para su tratamiento (*Op. Cit.*).

1.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA UNIÓN EUROPEA

1.2.1 Clasificación de las actividades económicas europeas

En la Unión Europea, la clasificación común para las actividades económicas es la clasificación general de actividades económicas en las Comunidades Europeas (NACE por las siglas en francés de Nomenclature générale des Activités économiques dans les Communautés Européennes). Las cantidades generadas de residuos peligrosos por tanto estarán relacionadas, cuando sea posible, con los códigos NACE los cuales tiene cuatro niveles. La clasificación que se emplea en los datos reportados está basada principalmente en el código NACE nivel 2 (*Op. Cit.*).

1.2.2 Datos disponibles de los estados miembros de la Unión Europea

La información disponible se puede apreciar en la tabla 1.1, de la cual se observa que las variaciones de los años de referencia son considerables; asimismo se dispone de información relacionada con más de un año para todos los países. En España, Bélgica y Alemania se emplean listas de conversión adicionales a nivel regional. Algunos países como Finlandia, Irlanda, Italia, Portugal y Grecia no requieren de tablas de conversión dado que ya usan el Código de Residuos Europeo y la Lista de Residuos Peligrosos para el registro nacional de sus datos. Los países que han introducido la Lista de Residuos Peligrosos en los sistemas nacionales de recolección de datos tienen discontinuidades en sus series de tiempo o han empezado su colección de datos en años recientes. En algunos países no se tiene acceso a datos nuevos, lo cual hace difícil establecer una tendencia confiable en relación a la generación de residuos peligrosos. El incremento de las cantidades de residuos peligrosos puede ser resultado de una mejor recolección de información y registro de los residuos, y no necesariamente el resultado de un incremento real en la generación de residuos. Un problema general es que la Lista de Residuos Peligrosos está compuesta de muy pocos códigos que cubren lo que se considera como residuos peligrosos en cada país, por lo tanto, cuando se comparan las cantidades totales de residuos peligrosos generados entre los países, las variaciones existentes se pueden explicar parcialmente por éste hecho. (EUROSTAT/OECD, 2000, citado por Brodersen *et al.*, 2001 y por Agencia Ambiental Europea, 2005; Brodersen *et al.* 2001; Agencia de Protección al Ambiente – Irlanda, 2001; EUROSTAT/OECD 2002, citado por Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia de Protección al Ambiente – Austria, 2005, citado por Agencia Ambiental Europea, 2005)

1.2.3 Europa Central

Para efectos del presente análisis, la región central de Europa está integrada por Austria, Alemania, Luxemburgo, Eslovaquia, Eslovenia, Hungría, Polonia y República Checa, de los cuales todos tienen una lista de conversión de sus respectivos códigos de clasificación de residuos peligrosos al Catálogo Europeo de Residuos. Con excepción de Hungría, la mayoría de los países que forman esta región han tratado de proporcionar información sobre la generación de residuos peligrosos con relación a la clasificación económica NACE; la cantidad de residuos generados por cada país se puede apreciar en la figura 1.1. Nótese que en todos los países que conforman esta región de Europa se observa que la generación de residuos peligrosos se incrementa hasta un aparente valor máximo y posteriormente decrece, sin embargo este aparente decremento se debe, en parte, a la reclasificación que sufren dichos residuos al emplear la Lista de Residuos Peligrosos y el Catálogo Europeo de Residuos, ya que existen clasificaciones nacionales que son más rígidas que éstas últimas, además de los problemas relacionados con el cambio de metodología de reporte. De igual manera se debe tomar en cuenta el aumento en el número de empresas que son obligadas a informar su generación de residuos peligrosos conforme se va implementando la normatividad establecida por la Comunidad Europea. Mención especial merece la importación legalmente autorizada de residuos peligrosos con el fin de recuperar energía de estos y para su disposición segura; en el caso de la exportación legalmente autorizada de residuos peligrosos para su disposición segura está limitada a cierto tipo de residuos y países específicos, tal es el caso de los asbestos y plaguicidas que se envían a Alemania. (Gobierno de la República de Eslovenia, 1996, citado

en Comunidad Europea, 2004; Ministerio del Ambiente y Planeación Especial de Eslovenia, 1999; Ministerio del Ambiente de la República Checa, 2001; Comisión Europea, 2002b; Comisión Europea, 2002c; Comisión Europea, 2002d; Gobierno de la República de Eslovenia, 2003; Hungría, 2002, citado en Comunidad Europea, 2004; Ministerio del Ambiente de la República de Eslovaquia, 2002; OECD, 2003; Comunidad Europea, 2004; Comisión Europea, 2005; EUROSTAT/OECD, 2000, citado por Brodersen *et al.* 2001 y por Agencia Ambiental Europea, 2005; EUROSTAT/OECD, 2002, citado por Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia de Protección al Ambiente – Austria, 2005, citado por Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia Ambiental de la República de Eslovenia, 2006)

Tabla 1.1 Perspectiva de la información proporcionada para el estudio.

País / región	Años con información disponible.	Lista de conversión de la clasificación nacional al CER.	Cumple con la clasificación NACE.
Alemania ¹	1990, 1993, 1996-2000	Sí	Sí
Alemania, North Rhine–Westphalia ¹	1993	Sí	Sí
Austria ^d	1990-1999	Sí	Sí
Bélgica, Flanders ¹	1994-1997	Parcialmente	Sí
Bélgica, Wallonia ¹	1995-1998	No	No
Bulgaria [*]	1992-1994, 1996-2001	Sí	---
Chipre ^e	1994-1997 y 2001	No Disponible	---
Dinamarca ^a	1990-1996 y 1998-2000	Sí	Sí
Eslovaquia ^e	1995-2000	Sí	No Disponible
Eslovenia ^e	1995, 1998 y 2001	Sí	Sí
España ^c	1990, 1994, 1995, 2000	Sí	Sí
España, Cataluña ^c	1994-1995	Sí	Sí
España, País Vasco ^c	1994	Sí	Sí
Estonia ^e	1995-2000	Sí	No Disponible
Finlandia ^d	1992, 1997 y 2000	Sí	Sí
Francia ¹	1992, 1996	No Disponible	No
Grecia ^b	1990, 1992, 1995, 1997-2000	No	Sí
Hungría ^e	1990-2000	Sí	No Disponible
Irlanda ^a	1990, 1992, 1995, 1996, 1998	Sí	Sí
Italia ¹	1990, 1991, 1995, 1997, 1998	Sí	Sí
Letonia ^e	1994-2001	Sí	No Disponible
Lituania ^e	1992-2001	Sí	No Disponible
Luxemburgo ¹	1990 y 1993-2000	---	---
Malta ^e	1998-2001	No Disponible	---
Países Bajos ¹	1990, 1992-1999	No	Sí
Polonia ^e	1992 y 1994-2001	Sí	No Disponible
Portugal ^c	1994, 1995, 1997, 1998	No	Sí
Reino Unido ^a	1990-1994	---	---
República Checa ^e	1995-2001	Sí	No Disponible
Rumania [*]	1995-2000	Sí	No Disponible
Suecia ^d	1990, 1994, 1998	No	Sí
Notas: ¹ País fundador. ^a País adherido en 1973 ^b País adherido en 1981 ^c País adherido en 1986 ^d País adherido en 1995 ^e País adherido en 2004 [*] País adherente en el año 2007 --- Sin información.			

Fuentes: Instituto Francés del Ambiente, 1999; Agencia de Protección al Ambiente – Irlanda, 2001; Brodersen *et al.*, 2001; Comunidad Europea, 2004; Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia de Protección al Ambiente – Austria, 2005, citado por Agencia Ambiental Europea 2005; Agencia Ambiental de la República de Eslovenia, 2006.

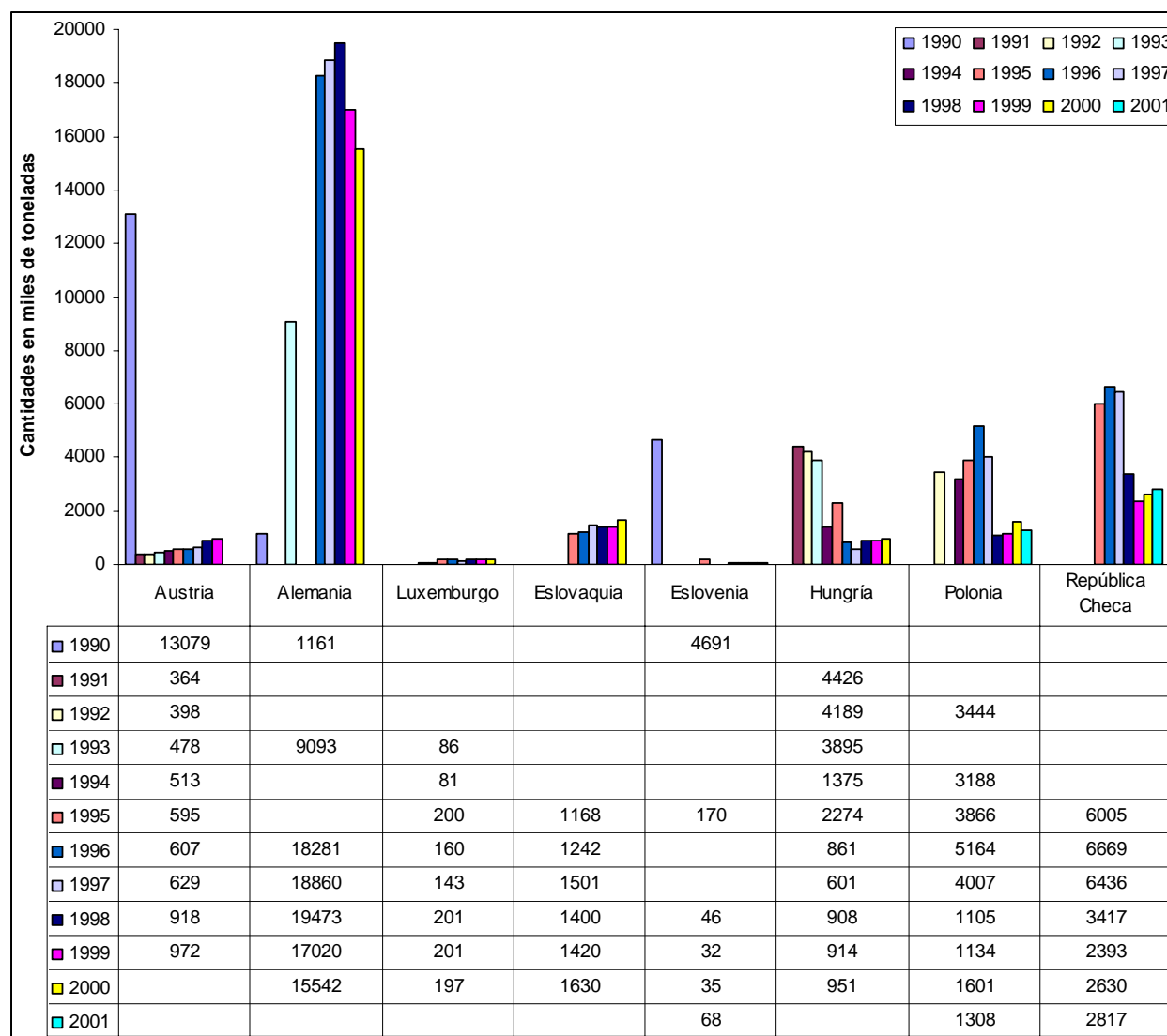


Figura 1.1 Generación de residuos peligrosos en Europa Central.

Fuente: extraído de Brodersen et al., 2001; Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia Ambiental de la República de Eslovenia, 2006.

1.2.4 Europa del Norte

Para este estudio la región del norte de Europa está integrada por Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Irlanda, Países Bajos, Suecia, Reino Unido, Estonia, Letonia y Lituania. Como se aprecia en la tabla 1.1 no todos los países de esta región cuentan con alguna lista de conversión a la clasificación establecida por la Comunidad Europea, por lo que no se puede realizar una comparación entre las cantidades de residuos peligrosos generados por cada país. De la figura 1.2, se observa que existen variaciones considerables en las cantidades de residuos peligrosos generadas por cada país de esta región; en el caso de Bélgica debe tomarse en cuenta que la información presentada en 1994 corresponde únicamente a la información proporcionada por la ciudad de Flanders, mientras que la información de los años 1995 a 1997 representa la información facilitada conjuntamente por las ciudades de Flaners y Wallonia, finalmente la información presentada para 1998 atañe únicamente a la aportada por la ciudad de Wallonia. A pesar de que existe un aparente descenso en la generación de éste tipo de residuos no se puede suponer que esto sea del todo cierto, debido a la escasa información que los diversos países

proporcionan, y en algunos casos sólo proporcionan información para algunas regiones de sus estados. Debido a que las cantidades de residuos reportadas no están referidas a un código en común, debe tomarse en cuenta que las diversas legislaciones nacionales pueden considerar o no a un residuo común a los demás países como peligroso, es decir, un país puede considerar a un residuo como peligroso, mientras que otro país puede no considerarlo como tal. Otras razones que justifican la disminución en la cantidad generada de residuos peligrosos son la reestructuración de la economía y la consecuente alteración de la producción en varias ramas o el cierre de los sitios de producción. (Foro Ambiental Báltico, 2000; EUROSTAT/OECD, 2000, citado por Brodersen *et al.*, 2001 y por Agencia Ambiental Europea, 2005; Centro de Información Ambiental de Estonia, 2001; Ministerio del Ambiente de la República de Lituania, 2001; Agencia de Protección al Ambiente – Irlanda, 2001; Comisión Europea, 2002a; EUROSTAT/OECD, 2002, citado por Agencia Ambiental Europea, 2005; Comunidad Europea, 2004; Agencia Ambiental Europea, 2005;)

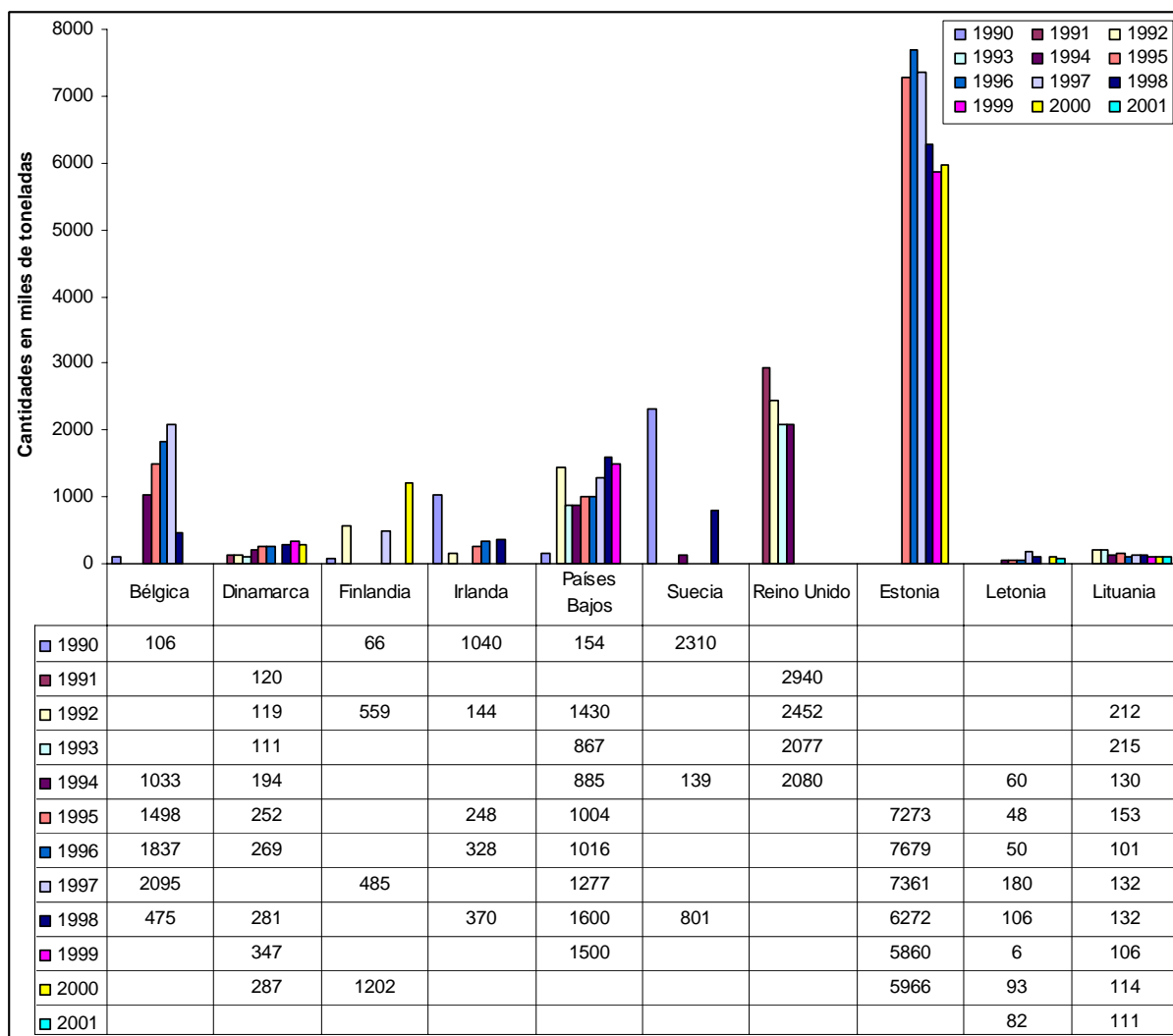


Figura 1.2 Generación de residuos peligrosos en Europa del Norte.

Fuente: extraído de Agencia de Protección al Ambiente – Irlanda, 2001; Brodersen *et al.*, 2001; Ministerio del Ambiente de la República de Lituania, 2001; Comisión Europea, 2002a; Comisión Europea, 2002c; Agencia Ambiental Europea, 2005.

1.2.5 Europa del Sur

Europa del sur, integrada por España, Portugal, Italia, Malta, Grecia y Chipre, ha proporcionado datos escasos acerca de su generación de residuos peligrosos, tal y como se muestra en la figura 1.3. Mientras que Italia y España sí cuentan con una lista de conversión de residuos peligrosos, Portugal y Grecia no la tienen, por lo cual emplean sus respectivas listas de clasificación nacionales para reportar los residuos peligrosos que generan; este hecho dificulta establecer una tendencia en la generación de residuos peligrosos; el diferente tipo de actividades económicas aunado con la falta de unicidad en los criterios de clasificación de los residuos, hace que las diferencias entre las cantidades de residuos peligrosos reportados varíen considerablemente a lo largo del tiempo. (OECD, 1997; EUROSTAT, 2000; EUROSTAT/OECD, 2000, citado por Brodersen *et al.*, 2001 y por Agencia Ambiental Europea, 2005; Brodersen *et al.*, 2001; Matos, 2002; EUROSTAT/OECD, 2002, citado por Agencia Ambiental Europea, 2005; Agencia Ambiental Europea, 2005)

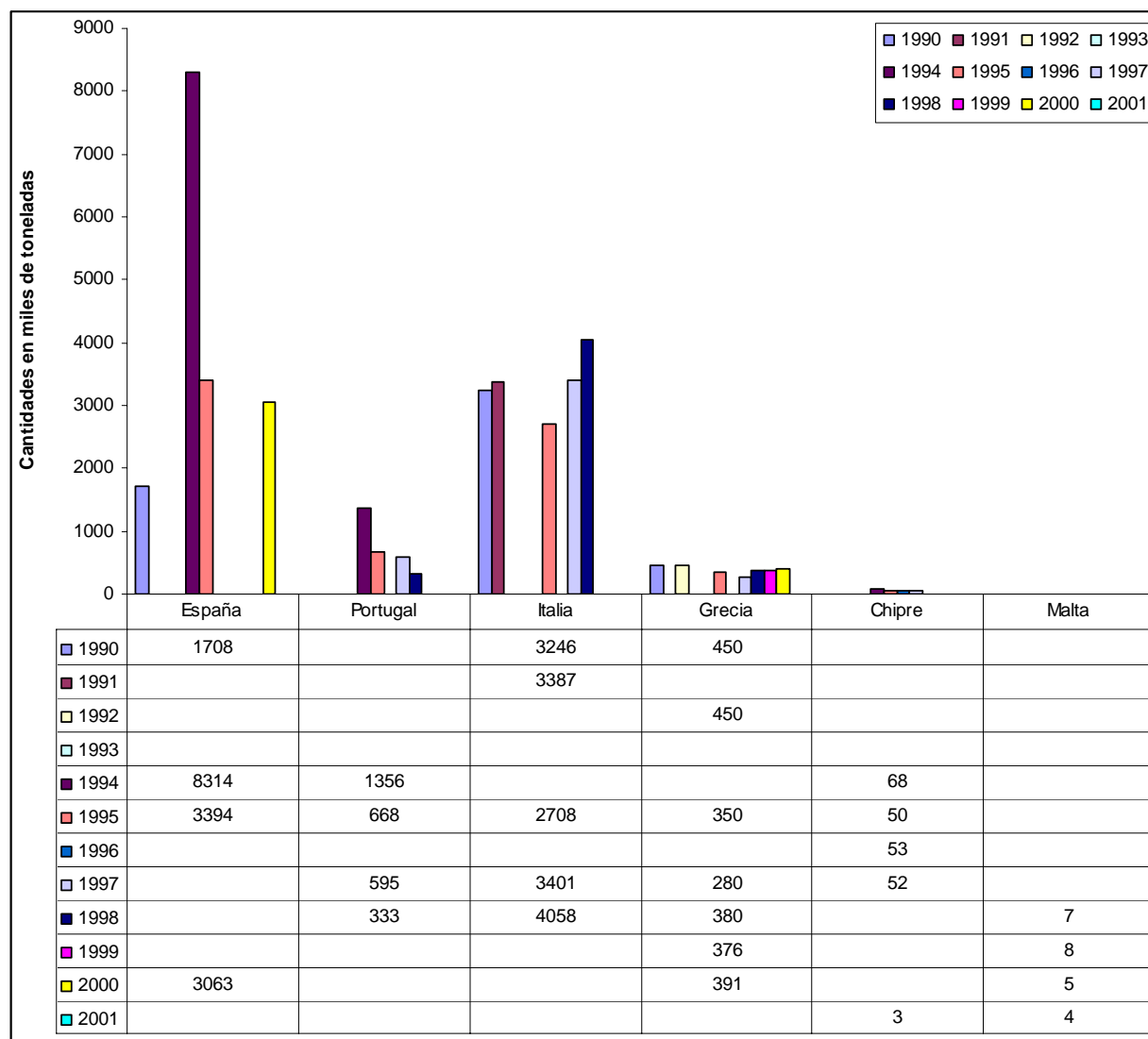


Figura 1.3 Generación de residuos peligrosos en Europa del Sur.

Fuente: extraído de OECD, 1997; Brodersen *et al.*, 2001; Agencia Ambiental Europea, 2005.

1.2.6 Europa del Este

En el caso del este de Europa, integrada por Bulgaria y Rumania, se tienen que los datos reportados hasta antes del año de 1998 están basados en sus respectivas clasificaciones nacionales, y posteriormente se adoptó la clasificación de residuos propuesta por la Comunidad Europea. En el caso de Bulgaria, se debe tomar en cuenta el hecho de que se ha exentado a la industria minera de reportar sus residuos peligrosos generados debido a su amplia contribución en la estructura de la generación de dichos residuos. En el caso de Rumania debe tomarse en cuenta que desde 1999, no están en operación tres de los principales generadores de residuos químicos, lo cual podría ser una razón de la fuerte disminución de las cantidades reportadas en los años de 1999 y 2000. La cantidad de residuos peligrosos generados en el este de Europa se puede apreciar en la figura 1.4. (EUROSTAT/OECD, 2000 citado por Brodersen *et al.*, 2001 y por Agencia Ambiental Europea, 2005; Brodersen *et al.*, 2001; Ministerio del Ambiente de la República Checa, 2001; UN-ECE, 2001; Rumania, 2002; EUROSTAT/OECD, 2002 citado por Agencia Ambiental Europea, 2005; Comunidad Europea, 2004; Agencia Ambiental Europea, 2005)

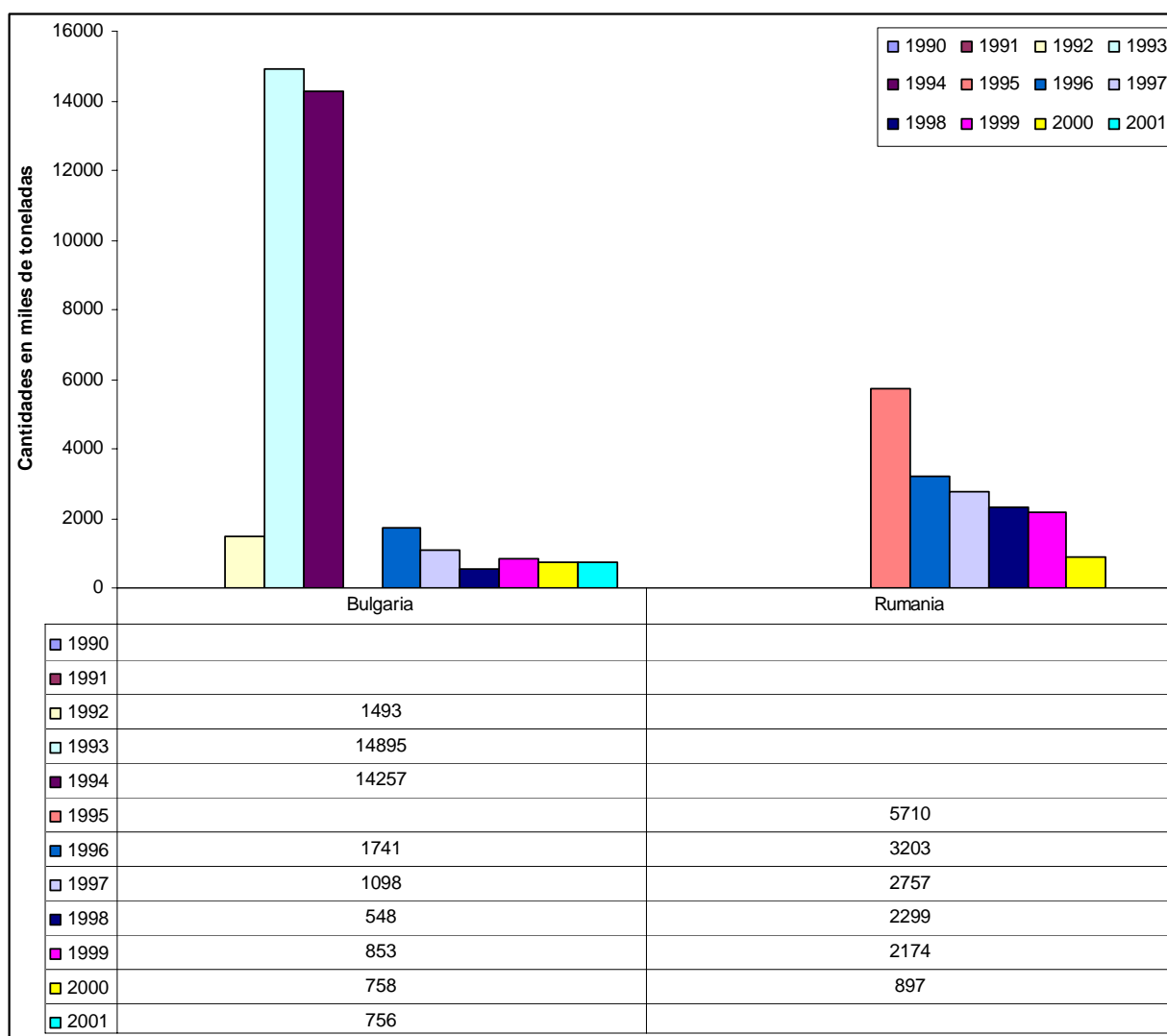


Figura 1.4 Generación de residuos peligrosos en Europa del Este.

Fuente: extraído de Brodersen *et al.*, 2001; Comunidad Europea, 2004; Agencia Ambiental Europea, 2005.

1.2.7 Europa del Oeste

Para efectos de este estudio, el oeste de Europa está integrado únicamente por Francia. Como se puede apreciar en la figura 1.5, la información proporcionada por Francia es sumamente escasa, además no se cuenta con información detallada sobre el origen de sus residuos peligrosos; se sabe que casi el 50% de los residuos peligrosos generados son incinerados, con el fin de recuperar energía de éstos, a la vez que la cantidad de residuos peligrosos depositados en rellenos sanitarios tiende a disminuir, con la correspondiente reducción de la capacidad de los mismos. Debe tenerse en cuenta que en Francia se permite la importación legalmente autorizada de residuos peligrosos con el fin de recuperar energía de estos, así como para su disposición segura, a pesar de que se limita a cierto tipo de residuos, como es el caso de los bifenilos policlorados (BPCs), cuya importación está permitida. (Instituto Francés del Ambiente, 1999; EUROSTAT, 2000; Brodersen *et al.*, 2001)

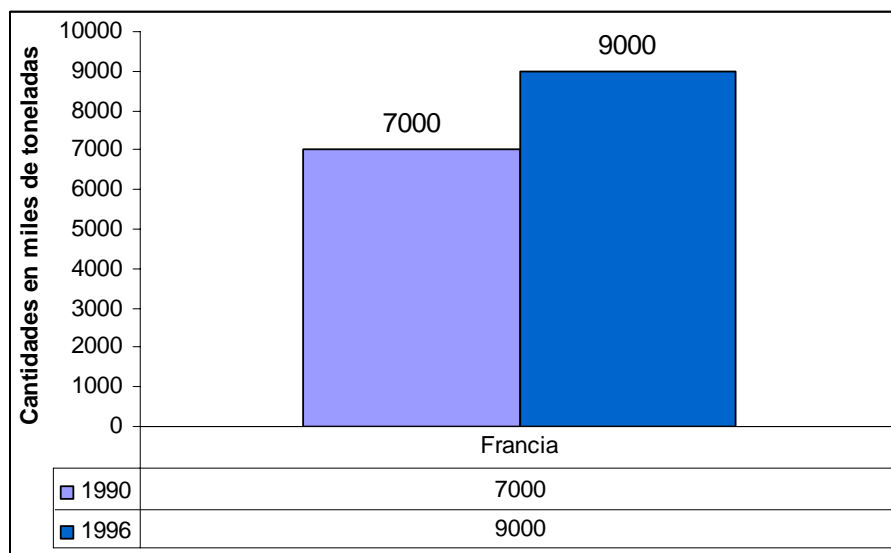


Figura 1.5 Generación de residuos peligrosos en Europa del Oeste.
Fuente: extraído de Instituto Francés del Ambiente, 1999; Brodersen *et al.*, 2001.

1.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN MÉXICO

En nuestro país actualmente se enfrentan problemas generados por el manejo inadecuado de los residuos peligrosos, los cuales se reflejan en la modificación de los ecosistemas con la consecuente pérdida de biodiversidad y, un aspecto muy importante: que constituye un peligro para la salud del ser humano. La problemática relacionada con los residuos peligrosos es muy compleja e involucra aspectos técnicos, políticos y sociales, ya que el desarrollo industrial que ha tenido el mundo y nuestro país en las últimas décadas no está relacionado con un esfuerzo similar en el desarrollo de instalaciones apropiadas para el almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de este tipo de residuos. El factor de mayor relevancia del problema lo constituye la falta de control de los residuos peligrosos, lo que trae como consecuencia su incorporación indiscriminada al ambiente. Tradicionalmente la industria los ha dispuesto en forma clandestina y sin ningún control, en terrenos baldíos o sitios abandonados, por lo que no existen datos precisos del volumen y tipo de residuos peligrosos que se generan anualmente (Rivero *et al.*, 1996).

Información proveniente del titular de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), indica que los residuos peligrosos arrojados por las 36 000 industrias, laboratorios y hospitales en México, se encuentran en total descontrol; asimismo indica que la generación de residuos peligrosos en México es del orden de 8 millones de toneladas por año, sin embargo la Secretaría sólo tiene certificadas 4 millones de toneladas, lo cual quiere decir que el 50% de lo que se podría considerar

residuos peligrosos no están bajo control de la autoridad federal; esta situación se agrava si se considera que algunos países trasladan ilegalmente sus residuos peligrosos a México. Cabe mencionar que se establece en orden de aproximación, la importación de 3,7 millones toneladas por año de sustancias peligrosas, y se importan aproximadamente 600 toneladas al año de residuos peligrosos sólo para su reciclaje, de igual forma debe hacerse notar que la normatividad nacional prohíbe la importación de sustancias peligrosas para su tratamiento o confinamiento en el país (Teorema Ambiental, 2005; Noticieros Televisa, 2005).

Es importante destacar que en 1994 se realizó una *estimación* del volumen anual de generación de residuos peligrosos en el país, utilizando como referencia las estimaciones realizadas en Ontario, Canadá, acerca de la generación de los diversos giros que componen su industria y suponiendo que las empresas mexicanas de los mismos giros generarían volúmenes semejantes. A partir de esa estimación, se calculó que en México se estarían generando alrededor de 8 millones de toneladas anuales de residuos peligrosos. Sin embargo, este dato no toma en consideración el hecho de que empresas de un mismo giro pueden generar volúmenes diferentes de residuos peligrosos, en función de los materiales que empleen como insumos, del tipo de procesos o tecnologías que utilicen, así como de la eficiencia de sus sistemas de producción. Por tal razón, esa cifra sólo se usa como un marco de referencia y se prefiere utilizar el volumen que manifiestan los generadores de residuos peligrosos registrados, aunque este dato también requiere ponerse en perspectiva tomando en cuenta todos los señalamientos que se hacen sobre sus alcances y limitaciones (DGGIMAR, 2005).

El Colegio de Ingenieros Geólogos de México, señala que desde 1993 a la fecha no se ha construido un nuevo confinamiento para residuos peligrosos, a pesar de que se estima que de los 8 millones de toneladas que se producen anualmente al menos el 90% no son canalizadas a confinamientos seguros, pues la mayoría de este material altamente contaminante termina en basureros a cielo abierto o en barrancas de todo el país contaminando ríos, cañadas, desiertos, etcétera. De igual manera se afirma que “tan sólo los pasivos ambientales de Petróleos Mexicanos (PEMEX) pueden sumar cientos de lugares altamente contaminados, a los que se deben sumar minas y campos industriales”. Por lo que respecta a los riesgos generados por la industria petroquímica, la cual produce la mayor cantidad de sustancias altamente cancerígenas y contaminantes del país, señalan que PEMEX genera 558 mil 141 toneladas anuales de estos contaminantes, de las cuales la industria petroquímica genera 63,5% y las refinerías el 36,5% restante (Periódico La Jornada, 2005). Cabe mencionar que PEMEX-Refinación, al igual que cualquier otra industria de Refinación en el mundo, genera dentro de su proceso productivo diversos residuos, cuyas características les confieren el carácter de peligrosos, según la normatividad vigente. Los principales residuos son: lodos aceitosos, lodos plomizos, lodos blancos, catalizadores agotados y aceites gastados.

Según las cifras proporcionadas por las autoridades, la producción de residuos peligrosos en México ha ido en aumento; así en 1986 se estimaba una producción anual de 2,737 millones de toneladas (SEDUE, 1986), en 1990 se llegó a 5,657 millones de toneladas (SEDESOL, 1993) y para 1995 se calculó una generación de entre 7 y 7,5 millones de toneladas anuales (Díaz-Barriga, 2001). Cabe considerar que aún con estos datos se ha establecido que en 10 años se ha triplicado la producción de residuos, sin embargo no se ha incrementado la capacidad instalada para su manejo adecuado en el mismo periodo. Además de que hasta el año de 1993 se contaba con industrias recicladoras de solventes, de aceites lubricantes y de metales, la infraestructura para el manejo de los residuos peligrosos era mínima. No resulta extraño entonces que 90% de los residuos peligrosos en México no recibieran un tratamiento adecuado (Periódico La Jornada, 1994). El problema de que la gran mayoría de los residuos no se manejen correctamente puede ser aún más grave, ya que si se generan 7,5 millones de toneladas al año de residuos peligrosos, en el mismo lapso se producen 123 millones de toneladas de residuos mineros, casi 30 millones de toneladas provenientes de la industria química y prácticamente 12 millones de toneladas resultado del uso de agroquímicos (SEDESOL, 1993). Estos 165 millones de toneladas adicionales no están consideradas como peligrosas, si bien no existe un sustento para su exclusión (Díaz-Barriga, 2001). Al considerar este nuevo total, el 96% de los residuos peligrosos no se estarían manejando en forma adecuada. Con esta cifra se llega al verdadero problema, para 1993 solamente se controlaba el 4% de los residuos, ya que por desgracia los residuos se localizaban en ríos y mares (Río Coatzacoalcos (Botello *et al.*, 1992), Golfo de México (Botello *et al.*, 1991), etc.); en lotes baldíos (tambos

en Monterrey, Nuevo León (Periódico El Norte, 1992), en Ciudad Juárez, Chihuahua (Periódico La Jornada, 1992)); en desiertos (tambos en el altiplano potosino (Díaz-Barriga *et al.*, 1993)); en minas abandonadas (bifenilos policlorados en Zacatecas (Ortiz *et al.*, 1987)); en el alcantarillado urbano (sangre proveniente de la Clínica 1 del Instituto Mexicano del Seguro Social en Coahuila (Periódico Reforma, 2006)); en poblaciones donde, por ignorancia, son utilizados como material de construcción (pavimentación de calles en el Estado de México (Ortiz *et al.*, 1987), construcción de casas en el altiplano potosino (López *et al.*, 1987)); en los traspatios de industrias; y, probablemente, en muchos otros sitios (Díaz-Barriga, 2001).

En las figuras 1.6 y 1.7 se indica el número de empresas que se han registrado como generadoras de residuos peligrosos y la cantidad de residuos generados a partir del año de 1999 hasta el año 2000. Es importante señalar que se estima que el universo de generadores potenciales puede ser superior a 100 mil, si se considera que tan sólo la industria de la transformación cuenta con más de 200 mil empresas, siendo más del 90% de ellas micro, pequeñas y medianas empresas. Chacón (2004) menciona que hasta el año 2003, cerca de 30 000 empresas manifestaron la generación de residuos peligrosos, además de que se estima que entre 90 000 y 300 000 empresas más no lo hacen.

En la figura 1.8 se indica la distribución porcentual por entidad federativa de los residuos peligrosos, que las empresas manifiestan generar anualmente; dichas cifras se revisan para precisarlas y actualizarlas, porque se considera que existen imprecisiones, ya que se corrigieron cifras que estaban expresadas en toneladas, cuando se trataban de litros como en el caso del estado de Guerrero, por ello disminuyó el volumen total de generación reportado previamente (SEMARNAT, 2003a; SEMARNAT, 2003b; DGGIMAR, 2005; SEMARNAT, 2005).

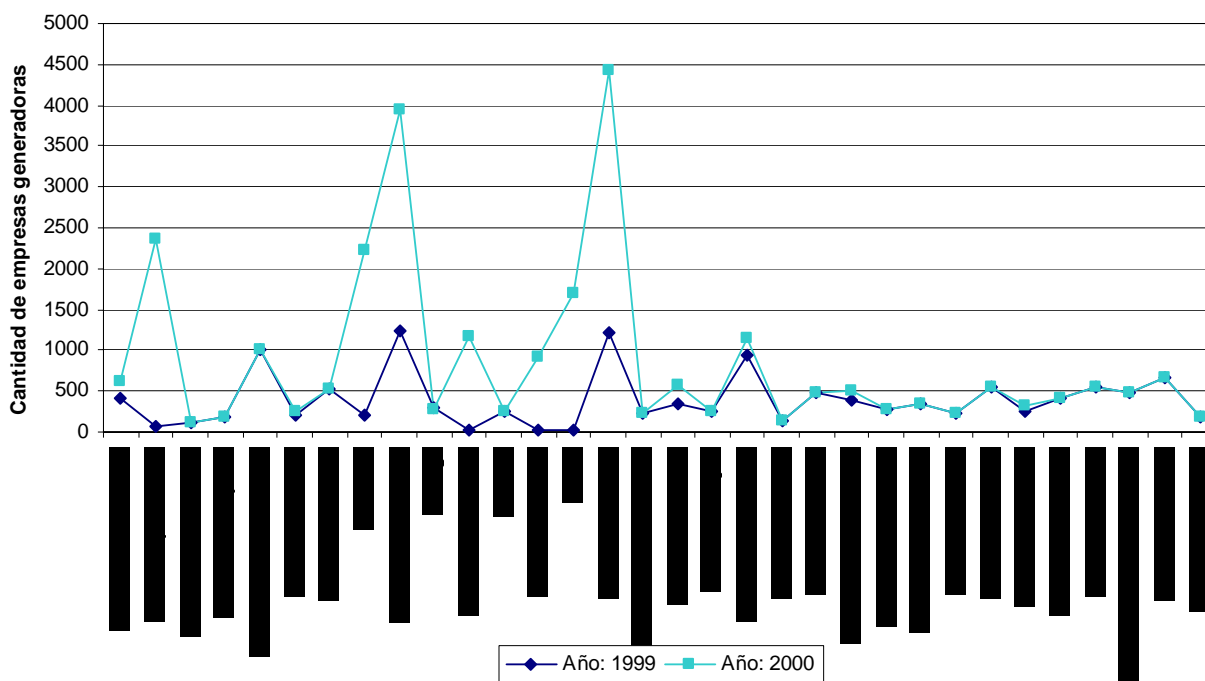


Figura 1.6 Cantidad de empresas que manifiestan la generación de residuos peligrosos.

Fuente: SEMARNAT, 2005.

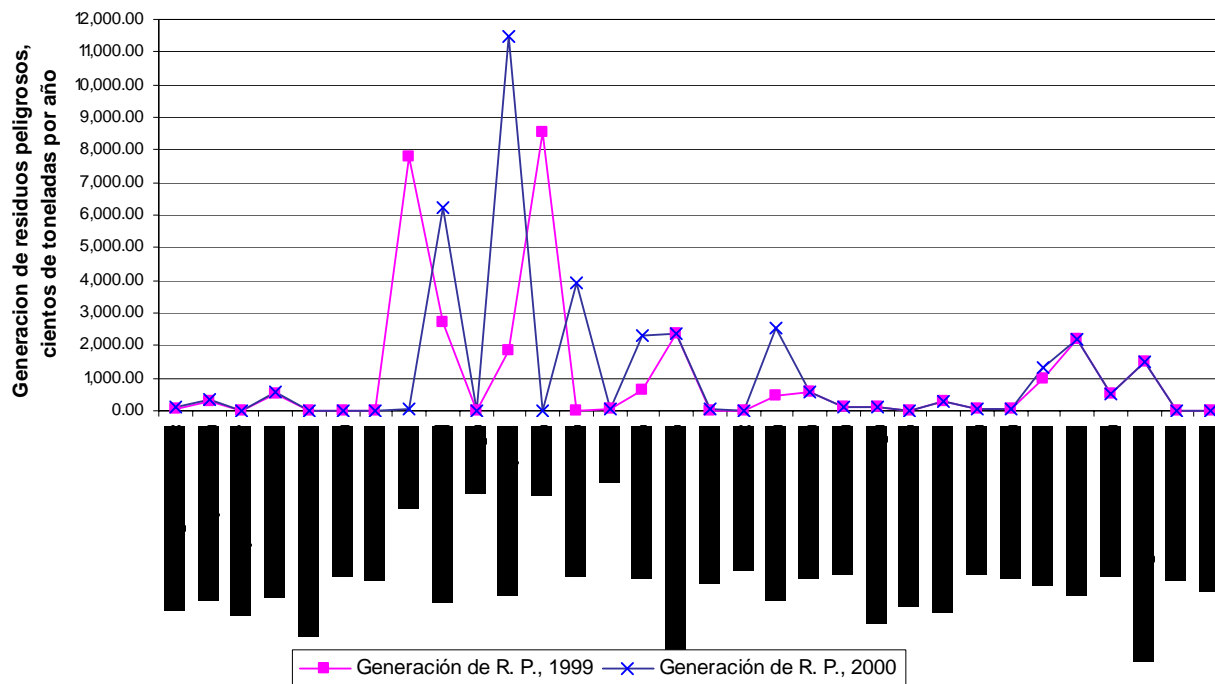


Figura 1.7 Generación de residuos peligrosos por entidad federativa para los años de 1999 y 2000.
Fuente: SEMARNAT, 2005.

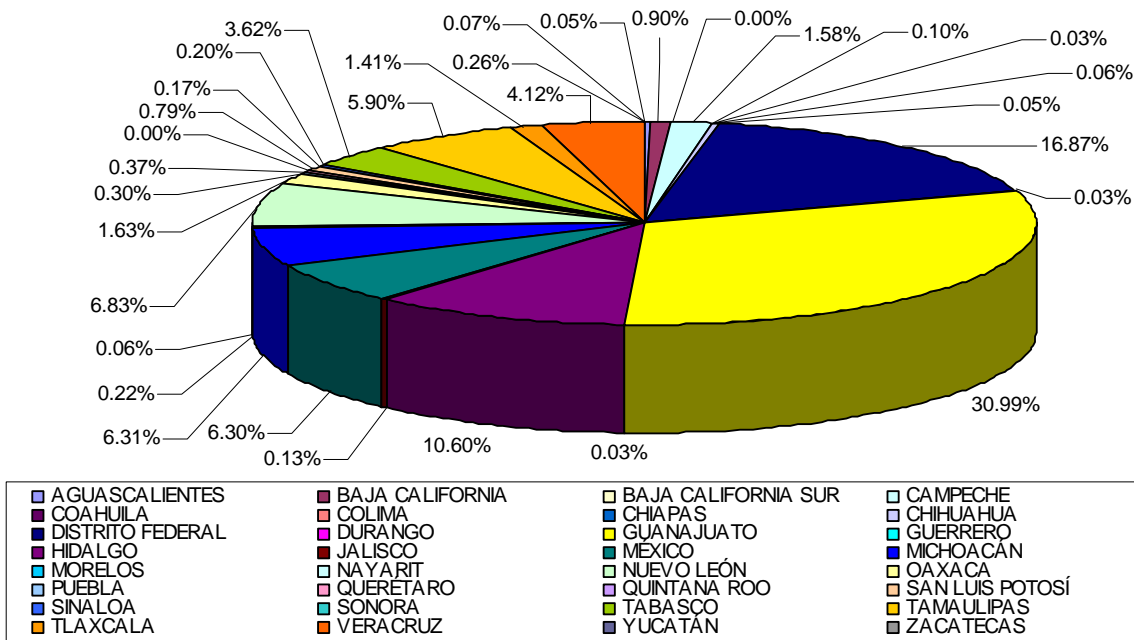


Figura 1.8 Distribución porcentual de la generación de residuos peligrosos por entidad federativa durante el año 2000.
Fuente: DGGIMAR, 2005.

1.3.1 Distribución geográfica de la generación de residuos industriales peligrosos en México

Dentro de los principales generadores de residuos peligrosos del país, se encuentra el estado de Guanajuato, el cual en el año 2000 contribuyó con cerca del 31% del total de los residuos peligrosos generados en todo el país, seguido del Distrito Federal (17% aproximadamente) y el estado de Hidalgo (con aproximadamente el 11%). Nótese que las cifras anteriores están referidas a la generación de residuos peligrosos que las empresas reportan a las autoridades. Por otro lado, la distribución geográfica de la generación de los residuos industriales peligrosos presenta el siguiente panorama: la región Centro (integrada por los estados de Guanajuato, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y Distrito Federal) alcanza casi el 59% de la generación total; le siguen la región Norte (formada por los estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Sonora, Nuevo León, Durango, Nayarit, San Luis Potosí, Sinaloa, Zacatecas, Aguascalientes, Colima y Jalisco) con el 19%, la región del Golfo (compuesta por los estados de Tamaulipas, Veracruz y Tabasco) con un 17%, y las regiones fronteriza y sur-sureste con el 5% restante. (Consejo Coordinador Empresarial - Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos A. C., 1998)

1.3.2 Infraestructura para el manejo de los residuos peligrosos en México

Con la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos y cinco Normas Oficiales Mexicanas que establecen los requisitos que deben reunir los sitios para ubicar confinamientos controlados, así como las especificaciones para el diseño, construcción y operación de los mismos (NOM-055-SEMARNAT-2003, NOM-056-SEMARNAT-1993, NOM-057-SEMARNAT-1993, NOM-058-SEMARNAT-1993 y NOM-145-SEMARNAT-2003), se establecieron las bases legales para el desarrollo de la infraestructura para el manejo de los residuos peligrosos. La política ambiental mexicana en esta materia promueve la prevención de su generación, su reducción a través del reuso y reciclado de los mismos, su tratamiento para reducir su volumen y peligrosidad y establece como última opción su confinamiento. En la figura 1.9 se muestra el desarrollo de la infraestructura nacional para las actividades anteriormente indicadas. En la figura 1.10 se muestra la distribución de las empresas autorizadas para el manejo de residuos industriales peligrosos por entidad federativa para los años 2000 y 2001. La distribución geográfica de la infraestructura autorizada para el acopio y transporte de residuos peligrosos hasta el año 2000 se muestra en la figura 1.11.

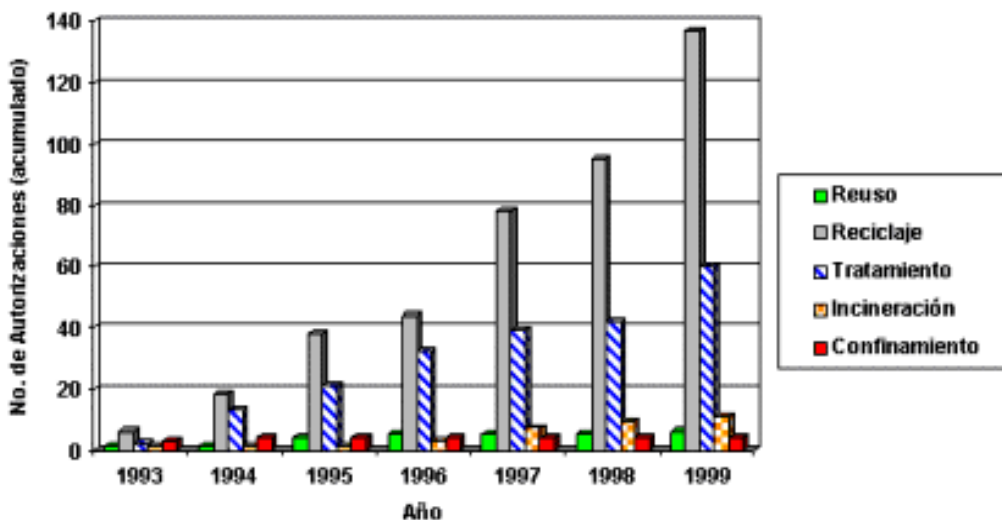


Figura 1.9 Evolución de la infraestructura de reuso, reciclado, tratamiento, incineración y confinamiento de residuos peligrosos de 1993 a 1999.

Fuente: SEMARNAT, 2003b.

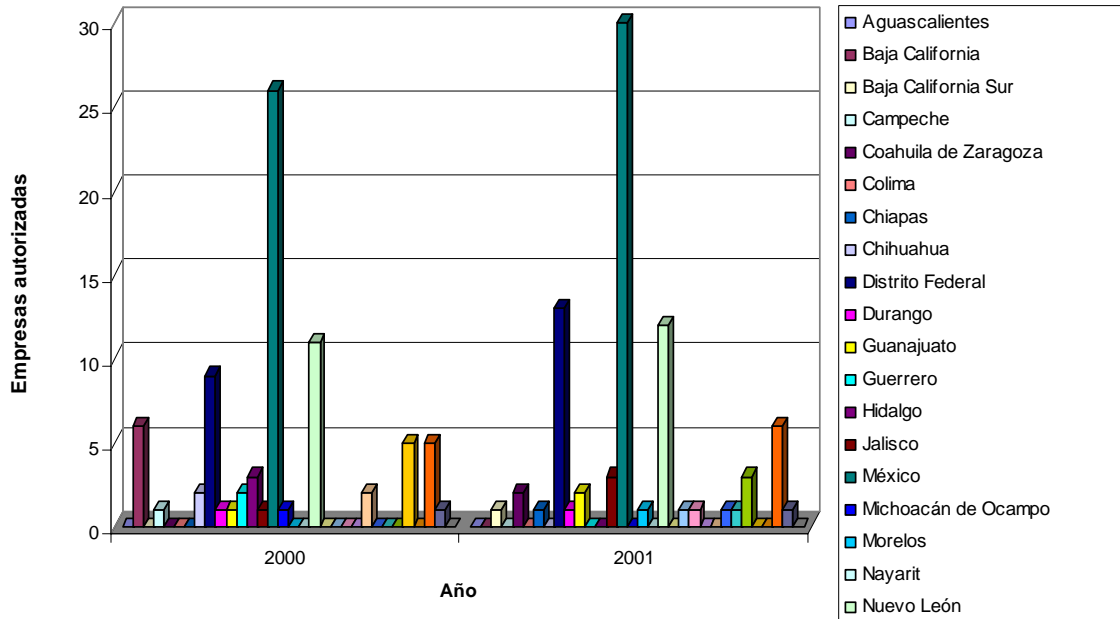


Figura 1.10 Empresas autorizadas para el manejo de residuos industriales peligrosos.
Fuente: SEMARNAT, 2002.

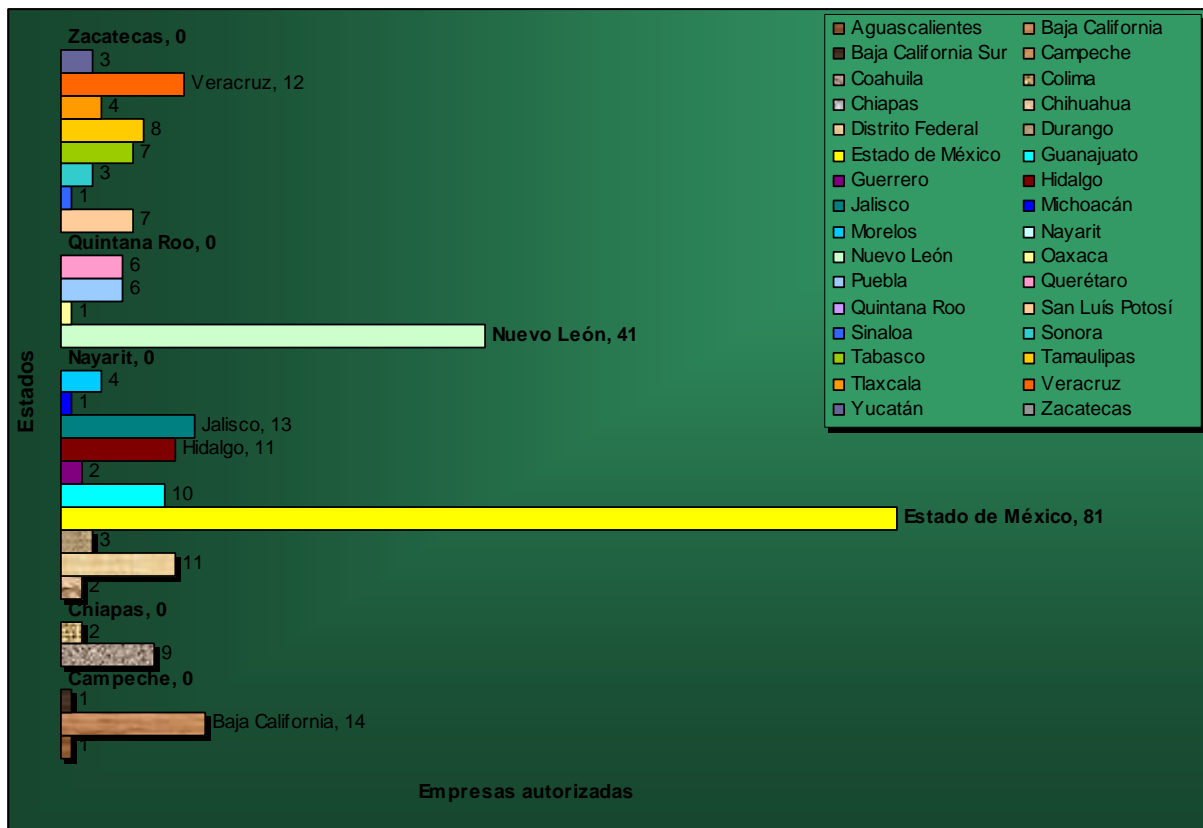


Figura 1.11 Infraestructura autorizada para el acopio y transporte de residuos peligrosos en el 2000.
Fuente: extraído de DGGIMAR, 2005.

Note que en los estados de Campeche, Chiapas, Nayarit, Quintana Roo y Zacatecas no existe infraestructura autorizada para el acopio y transporte de residuos peligrosos. Los estados con mayor infraestructura para estas actividades son el Estado de México y Nuevo León. A pesar de que el crecimiento de la infraestructura para el manejo de residuos peligrosos se ha ido incrementando, y que para algunos tipos de residuos se pudiera satisfacer las necesidades en gran medida, se considera que aún es necesario ampliar dicha infraestructura con una visión estratégica que responda a las necesidades de cada región (DGGIMAR, 2005).

De acuerdo con la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, para el año 2005 se otorgaron 91 nuevas autorizaciones para empresas que se dedican al acopio de residuos peligrosos, así como 2 renovaciones de autorización a empresas ya existentes para realizar dicha actividad. Además se otorgaron 16 nuevas autorizaciones a empresas que se dedican al acopio de residuos peligrosos biológico infecciosos y 2 renovaciones a empresas que se dedican a dicha actividad. Lo anterior indica un incremento de la infraestructura para el acopio de residuos peligrosos del 5,71% respecto al año 2000. Es importante destacar que solo una empresa realiza actividades confinamiento con una capacidad total de 660 000 ton/año (Chacón, 2004).

CAPITULO II. MARCO LEGAL NACIONAL E INTERNACIONAL EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS

2.1 CRITERIOS EMPLEADOS EN EL MUNDO PARA CLASIFICAR UN RESIDUO COMO PELIGROSO

2.1.1 Criterios aplicados en Estados Unidos de Norteamérica

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA por sus siglas en inglés), a través de la regulación 40 del Código Federal de Regulaciones parte 261, define como residuo peligroso a aquellas sustancias que presenten cualquiera de las siguientes características:

a) Residuos Inflamables (Código de riesgo I). Un residuo se considera inflamable si presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido y tiene un punto de inflamación menor de 60 °C, conforme el método del ASTM-D-93-79 o el método ASTM-D-3278-78 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (por las siglas en inglés de American Society for Testing and Materials - ASTM), con excepción de las soluciones acuosas con menos de 20% de alcohol en volumen.
- No es un líquido, y en condiciones normales de presión (1 atmósfera) y temperatura (25 °C) se puede incendiar por fricción, absorción de humedad, o cambios químicos espontáneos y, cuando se inflama, arde tan vigorosa y persistentemente que dificulta la extinción del fuego.
- Es un gas comprimido inflamable.
- Es un fuerte oxidante que puede liberar oxígeno y, como resultado, puede estimular la combustión y aumentar la intensidad del fuego en otro material.

b) Residuos Corrosivos (Código de riesgo C). Un residuo es corrosivo si presenta alguna de las siguientes propiedades:

- Es acuoso y tiene un pH igual o menor a 2, o igual o mayor a 12,5
- Es un líquido y provoca corrosión en el acero al carbón (grado SAE¹ 1030), a una razón mayor de 6,35 mm/año a una temperatura de 55 °C, de acuerdo con el método NACE (por las siglas en inglés de National Association Corrosion Engineers), estándar TM-01-693, o equivalente.

c) Residuos Reactivos (código de riesgo R). Un residuo es reactivo si presenta algunas de las siguientes características:

- ✱ Sustancias normalmente inestables que sufran cambios físicos y/o químicos violentos sin detonar.
- ✱ Reacciona violentamente con el agua.
- ✱ Forma una mezcla potencialmente explosiva cuando su superficie se mezcla con el agua.
- ✱ Cuando se mezcla con agua genera gases tóxicos, vapores, o humos en cantidad suficiente para ser un peligro.

¹ Siglas en inglés de la Sociedad de Ingenieros Automotrices.

- ✱ Es un residuo que contiene cianuros y sulfuros y que cuando está en medios con pH comprendido entre 2 y 12,5 puede generar gases tóxicos, vapores o humos.
- ✱ Es susceptible de detonación o de reacción explosiva si se le somete a una fuente energética de ignición o si es calentado bajo confinamiento o en condiciones normales de presión y temperatura.
- ✱ Es un explosivo clase A, clase B o prohibido.

d) Residuos Tóxicos (código de riesgo T). Son aquellos que producen efectos cancerígenos, mutagénicos o teratogénicos en los seres vivos. Si la muestra del residuo contiene en exceso cualquiera de las sustancias que se muestran en la tabla 261.31 del Código Federal de Regulaciones número 40, la cual puede observarse en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005², se considera peligroso, a menos que la Agencia de Protección al Ambiente del los Estados Unidos de Norteamérica concluya que el residuo no supone un peligro para la salud humana o el medio ambiente cuando sea transportado, almacenado, tratado o eliminado inapropiadamente a causa de:

- La concentración del componente en el residuo.
- La naturaleza de la toxicidad presentada por el componente
- La persistencia del componente o de cualquier producto tóxico de degradación.
- El grado en el que los componentes o cualquier producto de degradación de los mismos, se bioacumulen en los ecosistemas.
- Las cantidades de residuos generados en los puntos individuales de generación, o en ámbito regional o nacional.

2.1.2 Criterios aplicados en Brasil

En Brasil la peligrosidad de un residuo se define como la característica que, por sus propiedades físicas, químicas o infectocontagiosas, pueda generar los siguientes riesgos potenciales:

- Riesgo a la salud pública, acentuando en forma significativa, un aumento de la mortalidad o incidencia de enfermedades.
- Riesgo al ambiente, cuando un residuo es manejado en forma inadecuada.

Por otro lado, la Regulación Ambiental Brasileña, establece la siguiente clasificación para los residuos:

- **Residuos Clase I (Peligrosos).** Los residuos o la mezcla de ellos que por sus características de inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad y patogenicidad, puedan generar los riesgos potenciales antes mencionados.
- **Residuos Clase II (No-Inertes).** Son aquellos que no se encuadran dentro de las definiciones para los residuos tipo clase I y clase III. Estos residuos, pueden presentar propiedades tales como: combustibilidad, biodegradabilidad y solubilidad en agua.
- **Residuos Clase III (Inertes).** Son aquellos que en contacto estático o dinámico con agua destilada o deionizada, a temperatura ambiente, ninguno de sus constituyentes se solubiliza en concentraciones superiores a los estándares del agua potable, exceptuando solamente los estándares de aspecto, como: color, turbidez y sabor. Como ejemplo de estos residuos se puede citar a las llantas de los automóviles, plásticos, escorias y ciertos lodos muy estables.

Con la finalidad de establecer la identificación de los residuos peligrosos en Brasil, se aplican una serie de listados de residuos y sustancias consideradas como peligrosas, así como ciertos conceptos relacionados con algunas características de los residuos que a continuación se indican:

- **Lista No. 1:** Residuos peligrosos de fuentes no específicas.
- **Lista No. 2:** Residuos peligrosos de fuentes específicas.

² Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

- **Lista No. 3:** Constituyentes peligrosos.
- **Lista No. 4:** Sustancias que le confieren peligrosidad a los residuos.
- **Lista No. 5:** Sustancias agudamente tóxicas.
- **Lista No. 6:** Sustancias tóxicas.
- **Lista No. 7:** Concentraciones máximas permisibles en el extracto obtenido con las pruebas de solubilidad y lixiviación.

Las características que le confieren peligrosidad a un residuo pueden ser: inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad y patogenicidad. La manera de aplicar los listados mencionados es la que a continuación se describe. Una vez determinado el origen del residuo, se verifica, según sea el caso contra las listas 1 y 2 ó 5 y 6. Los residuos que no fueron identificados en esta etapa deben ser identificados en términos de sus constituyentes, dentro de los cuales se incluyen sustancias que puedan presentar características tóxicas, cancerígenas, mutagénicas o teratogénicas para los seres vivos o el hombre. La presencia de una sola de tales sustancias en el residuo, no implica necesariamente que deba ser clasificado como peligroso. Por tanto, en caso de una duda, deberá hacerse una evaluación más a fondo, de los siguientes factores:

- ◆ Naturaleza de la toxicidad del residuo.
- ◆ Concentración del constituyente en el residuo.
- ◆ Potencial de migración del constituyente hacia el ambiente.
- ◆ Persistencia del constituyente o de cualquier producto de su degradación.
- ◆ Capacidad de los constituyentes o los productos de su degradación, para bioacumularse en los ecosistemas.

2.1.3 Criterios aplicados en Europa

En *España* la Ley sobre Desechos y Residuos Sólidos Urbanos, considera dentro de su ámbito de aplicación a los residuos industriales; cuando estos presentan características de peligro o toxicidad, se exige al productor o poseedor de los mismos que, previamente a su recolección, realice un tratamiento para eliminar o reducir en lo posible estas características, o bien, que los deposite en forma o lugar adecuados. Dicha Ley establece una definición convencional para los residuos peligrosos, caracterizándolos además por su contenido en cuanto a alguna de las materias y sustancias consideradas como peligrosas (en concentraciones o cantidades que representen un riesgo para la salud humana, recursos naturales y medio ambiente). Así mismo, deja al Gobierno la facultad de establecer esas concentraciones o cantidades. Últimamente, a estos listados se han agregado tres tipos de sustancias: los aceites usados, los residuos procedentes de la industria del dióxido de titanio y los BPCs, que en las regulaciones de la Comunidad Europea, se emplean criterios específicos para manejarlos, lo que sin duda también ocurre en las regulaciones de España. Otro concepto interesante que incluye la Ley española sobre los Residuos Peligrosos, es que pueden ser incluidos nuevos residuos peligrosos, a petición de las Administraciones Autónomas y Locales, o bien de grupos sociales que cumplan con la reglamentación específica para ello. Quedan excluidos los residuos radiactivos, los residuos de la minería, las emisiones a la atmósfera y los efluentes descargados al alcantarillado, a los cauces de agua o al mar. Esta última exclusión está hecha para salvar las competencias de las autoridades municipales y de administración del agua, en el establecimiento de las condiciones de descarga en los sistemas de alcantarillado y en los cuerpos de agua. Se incluyen dentro del listado de residuos peligrosos, los recipientes y envases que hayan contenido dichos residuos (Consejo Coordinador Empresarial - Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos A. C., 1998).

En el *Reino Unido*, el término de peligrosidad no se encuentra definido dentro del marco normativo ambiental. Se maneja el concepto *residuo controlado*, para considerar a los residuos generados en casas habitación, restaurantes, hospitales, comercios, escuelas y servicios en general. Ciertos residuos tales como los radiactivos, residuos de explosivos, residuos provenientes de minas y del beneficio de los minerales, así como los residuos agroquímicos, están sujetos a otro tipo de regulaciones. Por otro lado, se consideran como *residuos especiales*, a todos aquellos residuos controlados que puedan resultar peligrosos al ambiente o a la salud, o bien, que sean difíciles de tratar o disponer. Además deben

contener una o más de las 31 sustancias químicas consideradas como riesgosas por su normatividad. Dicho tipo de residuos, están definidos por las siguientes propiedades: (*Op. Cit.*)

- Punto de ignición menor a 21 °C.
- Toxicidad, tomando como referencia una dosis estándar de 5 cm³, que al ser ingerida, puede causar la muerte o un serio daño a un infante de 20 kg de peso.
- Carcinogenicidad, definida como cualquier residuo que contenga uno o más de los elementos carcinogénicos para el ser humano, en una concentración del 1% o más.
- Corrosividad, expresada como la propiedad de causar un serio daño al tejido humano, durante una exposición de 15 minutos o menos.

En *Alemania* la Ley General de los Residuos, establece la obligación de reciclar y disminuir la cantidad de los residuos, antes de disponerlos. Esta Ley establece la definición de los residuos como "*cosas u objetos inmóviles*" (concepto subjetivo) y "*objetos inmóviles cuya disposición final demanda el cuidado del bienestar general*" (concepto objetivo). El término *residuo peligroso* no está considerado dentro de la legislación alemana. Este término únicamente se utiliza para evitar que este tipo de residuos se mezclen con los residuos municipales. En la Ley se utiliza para identificar a aquellos *residuos que requiere un control especial*. Los residuos peligrosos que no tienen posibilidad de reutilizarse, deben disponerse de acuerdo a lo establecido en una guía técnica, la cual propone métodos que utilizan tecnologías de punta. La guía técnica, incluye un catálogo de residuos peligrosos y el método de tratamiento y/o disposición final recomendado para cada uno de ellos.

2.2 CRITERIOS EMPLEADOS EN MÉXICO PARA CLASIFICAR UN RESIDUO COMO PELIGROSO

De acuerdo con la terminología internacional, México ha adoptado la clave CRETIB³ para definir a los residuos peligrosos. La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) emitida en 1999, el Reglamento en materia de Residuos Peligrosos de la LGEEPA (1999) y las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) NOM-052-SEMARNAT-2005 y NOM-053-SEMARNAT-2005 definen a un residuo peligroso como:

"Todos aquellos residuos en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, venenosas y biológico infecciosas representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente".

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003) define a los residuos peligrosos como:

"Aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley"

La Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente, permite al generador identificar si sus desechos son peligrosos a partir de los criterios que se resumen a continuación:

1. Presencia de sustancias tóxicas en cantidades establecidas consideradas como límites máximos permisibles.
2. Generación de residuos en giros industriales y procesos particulares.
3. Generación de residuos en fuentes no específicas.

³ Iniciales de las palabras Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico infeccioso.

4. Generación de residuos derivados del empleo de materias primas peligrosas en la producción de pinturas.
5. Generación de residuos, bolsas o envases de materias primas peligrosas empleadas en la producción de pinturas.
6. Identificación de características peligrosas de los residuos mediante una prueba de laboratorio para determinar si son corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables o biológico-infecciosos (análisis CRETIB).

2.3 MARCO LEGAL EN MATERIA AMBIENTAL SOBRE EL MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS EN MÉXICO

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, a través de los artículos 4, 25, 27, 63 y 115, hace referencia a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente en territorio nacional y zonas sobre las que ejerce su soberanía y jurisdicción.

La LGEEPA se encuentra dividida en seis títulos y está compuesta por 204 artículos, más 4 artículos transitorios. Dentro del Título Cuarto, Capítulo VI; se halla lo relativo a los materiales y residuos peligrosos (artículos del 150 al 153). La definición de *residuo peligroso* se encuentra en el artículo tercero fracción XXXII, del Título Primero, Capítulo I, que a la letra dice así:

“Todos aquellos residuos en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológico-infecciosas, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente”.

En el artículo quinto, del Título Primero, Capítulo II, de la LGEEPA, se establecen como facultades de la federación las siguientes:

- Fracción V. La expedición de las Normas Oficiales Mexicanas.
- Fracción VI. “La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas⁴ y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales, de conformidad con esta Ley, otros ordenamientos aplicables y sus disposiciones reglamentarias”.
- Fracción X. La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades a que se refiere el artículo 28 de la Ley, y en su caso la expedición de las autorizaciones correspondientes. En los casos de actividades altamente riesgosas se debe presentar además, un estudio de riesgo (artículo 30 de la LGEEPA).

En el artículo 28, Fracción IV, del Título Primero, Capítulo IV, Sección V; se establece que es necesaria la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) cuando se trate de instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos y la fracción XIII para los casos de obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal. El Capítulo VI, del Título Cuarto, está dedicado exclusivamente a los residuos peligrosos, como se indica a continuación:

- ❖ El artículo 150 establece que el manejo de los materiales y residuos peligrosos se debe hacer de acuerdo a la Ley, su Reglamento y las Normas Oficiales Mexicanas que expida la SEMARNAT. Asimismo, establece que la regulación de esos materiales y residuos peligrosos, incluirá según

⁴ Acción o conjunto de acciones, ya sea de origen natural o antropogénico, que estén asociadas con el manejo de sustancias que contengan alguna o varias de las siguientes propiedades: inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radiactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionarían una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

corresponda, su uso, recolección, almacenamiento, transporte, reuso, reciclaje, tratamiento y disposición final.

- ❖ El artículo 151 determina que el manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera, aún cuando se contraten los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría, en cuyo caso la responsabilidad es compartida por ambas partes. Asimismo se establece que las personas que manejen residuos peligrosos deben hacerlo del conocimiento de la SEMARNAT.
- ❖ En el artículo 151-bis se establece la necesidad de contar con la autorización previa de la SEMARNAT para operar e instalar sistemas que involucren cualquier tipo de manejo de residuos peligrosos, incluyendo aquellos destinados para la recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y/o disposición final.
- ❖ En el artículo 152 se establece que la SEMARNAT promoverá programas tendientes a prevenir y reducir la generación de residuos peligrosos así como a estimular su reuso y reciclaje.
- ❖ En el artículo 152-bis se indica que cuando la generación o manejo de residuos peligrosos produzca contaminación del suelo, los responsables de las operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo.
- ❖ Por último, el artículo 153 indica que la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos se sujetará a las restricciones que establezca el Ejecutivo Federal, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Comercio Exterior, y en todo caso se deberán observar las disposiciones siguientes:

1. Corresponde a la Secretaría el control y la vigilancia ecológica de los materiales y/o residuos peligrosos importados o a exportarse, aplicando las medidas de seguridad que correspondan, sin perjuicio de lo que sobre este particular prevé la Ley Aduanera.
2. Únicamente podrá autorizarse la importación de materiales o residuos peligrosos para su tratamiento, reciclaje o reuso, cuando su utilización sea conforme a las leyes, reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones vigentes.
3. No podrá autorizarse la importación de materiales o residuos peligrosos cuyo único objeto sea su disposición final o simple depósito, almacenamiento o confinamiento en el territorio nacional o en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, o cuando su uso o fabricación no esté permitido en el país en que se hubiere elaborado.
4. No podrá autorizarse el tránsito por territorio nacional de materiales peligrosos que no satisfagan las especificaciones de uso o consumo conforme a las que fueron elaborados, o cuya elaboración, uso o consumo se encuentren prohibidos o restringidos en el país al que estuvieren destinados; ni podrá autorizarse el tránsito de tales materiales o residuos peligrosos, cuando provengan del extranjero para ser destinados a un tercer país.
5. El otorgamiento de autorizaciones para la exportación de materiales o residuos peligrosos quedará sujeto a que exista consentimiento expreso del país receptor;
6. Los materiales y residuos peligrosos generados en los procesos de producción, transformación, elaboración o reparación en los que se haya utilizado materia prima introducida al país bajo el régimen de importación temporal, inclusive los regulados en el artículo 85 de la Ley Aduanera, deberán ser retornados al país de procedencia dentro del plazo que para tal efecto determine la Secretaría.
7. El otorgamiento de autorizaciones por parte de la Secretaría para la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos quedará sujeto a que se garantice debidamente el cumplimiento de lo que establezca la presente Ley y las demás disposiciones aplicables así como la reparación de los daños y perjuicios que pudieran causarse tanto en el territorio nacional como en el extranjero.
8. Asimismo, la exportación de residuos peligrosos deberá negarse cuando se contemple su reimportación al territorio nacional, no exista consentimiento expreso del país receptor; el país de destino exija reciprocidad, o implique un incumplimiento de los compromisos asumidos por México en los Tratados y Convenciones Internacionales en la materia, y
9. En adición a lo que establezcan otras disposiciones aplicables, podrán revocarse las autorizaciones que se hubieren otorgado para la importación o exportación de materiales y residuos peligrosos, sin perjuicio de la imposición de la sanción o sanciones que corresponda en los siguientes casos:

- a) Cuando por causas supervenientes, se compruebe que los materiales o residuos peligrosos autorizados constituyen mayor riesgo para el equilibrio ecológico que el que se tuvo en cuenta para el otorgamiento de la autorización correspondiente.
- b) Cuando la operación de importación o exportación no cumplan los requisitos fijados en la guía ecológica que expida la Secretaría.
- c) Cuando los materiales o residuos peligrosos ya no posean los atributos o características conforme a los cuales fueron autorizados; y
- d) Cuando se determine que la autorización fue transferida a una persona distinta a la que solicitó la autorización, o cuando la solicitud correspondiente contenga datos falsos, o presentados de manera que se oculte información necesaria para la correcta apreciación de la solicitud.

Con relación al Reglamento de la LGEEPA en materia de Residuos Peligrosos, el artículo octavo indica que el generador de residuos peligrosos deberá:

- I. Inscribirse en el Registro que para tal efecto establezca la SEMARNAT.
- II. Llevar una bitácora mensual sobre la generación de sus residuos peligrosos.
- III. Dar a los residuos peligrosos el manejo previsto en el Reglamento y en las normas oficiales mexicanas.
- IV. Manejar separadamente los residuos peligrosos que sean incompatibles en los términos de las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- V. Envasar sus residuos peligrosos, en recipientes que reúnan las condiciones de seguridad previstas en este Reglamento y en las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- VI. Identificar sus residuos peligrosos, con las indicaciones previstas en este Reglamento y en las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- VII. Almacenar sus residuos peligrosos en condiciones de seguridad y en áreas que reúnan los requisitos previstos en el presente Reglamento y en las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- VIII. Transportar sus residuos peligrosos en los vehículos que determine la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y bajo las condiciones previstas en este Reglamento y las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- IX. Dar a sus residuos peligrosos el tratamiento que corresponda de acuerdo con lo dispuesto en el Reglamento y las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- X. Dar a sus residuos peligrosos la disposición final que corresponda de acuerdo con los métodos previstos en el Reglamento y conforme a lo dispuesto en las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- XI. Remitir a la SEMARNAT, en el formato que ésta determine, un informe semestral sobre los movimientos que hubiere efectuado con sus residuos peligrosos durante dicho período, y
- XII. Las demás previstas en el Reglamento y en otras disposiciones aplicables.

En el artículo 12 del Reglamento anterior, establece que las personas autorizadas por parte de la SEMARNAT para instalar y operar sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final deberán presentar, previo al inicio de sus operaciones, lo siguiente:

- I. Un programa de capacitación del personal responsable del manejo de residuos peligrosos y del equipo relacionado con éste.
- II. Documentación que acredite al responsable técnico, y
- III. Un programa para atención a contingencias.

A continuación se mencionan las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) en materia de residuos peligrosos:

- ✦ *NOM-052-SEMARNAT-2005*, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

- ✦ *NOM-053-SEMARNAT-2005*, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- ✦ *NOM-054-SEMARNAT-1993*, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la *NOM-052-SEMARNAT-2005*.
- ✦ *NOM-055-SEMARNAT-2003*, que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
- ✦ *NOM-056-SEMARNAT-1993*, que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Es importante indicar que esta norma oficial mexicana actualmente se encuentra en revisión y en proceso de integración, en la cual se incluirán las normas *NOM-057-SEMARNAT-1993* y *NOM-058-SEMARNAT-1993*.
- ✦ *NOM-057-SEMARNAT-1993*, que establece los requisitos que deben de observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos. Se debe mencionar que esta NOM, en la actualidad se encuentra en revisión y en proceso de incluirse dentro de la *NOM-056-SEMARNAT-1993*.
- ✦ *NOM-058-SEMARNAT-1993*, que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Conviene mencionar que esta norma oficial mexicana, actualmente se halla en revisión y en vías de incluirse en la *NOM-056-SEMARNAT-1993*.
- ✦ *NOM-145-SEMARNAT-2003* que establece las condiciones para el confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha generado una serie de Normas Oficiales Mexicanas, relacionadas con el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos, mismas que se enlistan a continuación.

- ✦ *NOM-002-SCT-2003*. Listados de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados.
- ✦ *NOM-003-SCT-2000*, que establece las características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-004-SCT-2000*. Sistema de identificación de unidades destinadas al transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-005-SCT-2000*. Información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-006-SCT2-2000*. Aspectos básicos para la revisión ocular diaria de la unidad destinada al autotransporte de materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-007-SCT2-2002*. Marcado de envases y embalajes destinados al transporte de sustancias y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-009-SCT2-2003*, que establece la compatibilidad para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos de la clase 1, explosivos.
- ✦ *NOM-010-SCT2-2003*, que establece las disposiciones de compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-011-SCT2-1994*, que establece las condiciones para el transporte de las sustancias, materiales y residuos peligrosos en cantidades limitadas.
- ✦ *NOM-018-SCT2-1994*, que establece las disposiciones para la carga, acondicionamiento y descarga de materiales y residuos peligrosos en unidades de arrastre ferroviario.
- ✦ *NOM-019-SCT2-2004*, que establece las disposiciones generales para la limpieza y control de remanentes de sustancias y residuos peligrosos en las unidades que transportan materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-021-SCT2-1994*, que establece las disposiciones generales para transportar otro tipo de bienes diferentes a las sustancias, materiales y residuos peligrosos en unidades destinadas al traslado de materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-024-SCT2-2002*. Especificaciones para la construcción y reconstrucción, así como los métodos de prueba de los envases y embalajes de las sustancias, materiales y residuos peligrosos.

- ✦ *NOM-025-SCT2-1994*, que establece las disposiciones especiales para las sustancias, materiales y residuos peligrosos de la clase 1, explosivos.
- ✦ *NOM-027-SCT2-1994*, que establece las disposiciones generales para el envase, embalaje y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos de la división 5.2, peróxidos orgánicos.
- ✦ *NOM-028-SCT2-1998*, que establece las disposiciones especiales para los materiales y residuos peligrosos de la clase 3, líquidos inflamables transportados.
- ✦ *NOM-032-SCT2-1995*. Para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos. especificaciones y características para la construcción y reconstrucción de contenedores cisterna destinados al transporte multimodal de materiales de las clases 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.
- ✦ *NOM-043-SCT-2003*. Documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- ✦ *NOM-046-SCT2-1998*. Características y especificaciones para la construcción y reconstrucción de los contenedores cisterna destinados al transporte multimodal de gases licuados a presión no refrigerados.

Además de los elementos de la estructura jerárquica antes descritos, existen otros publicados por la autoridad en materia ambiental, relacionados directamente con el cumplimiento que tanto los generadores como los prestadores de servicio, deben atender para informar sobre los movimientos que llevan a cabo entre sí, con residuos peligrosos. Estos ordenamientos consisten básicamente de manifiestos y reportes que deben ser presentados por los generadores de residuos peligrosos, o bien por aquellos dedicados al manejo de los mismos. Estos documentos son (Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos A. C., 1998):

- Manifiesto para empresas generadoras de residuos peligrosos (DOF⁵ 3 de mayo de 1989). Gaceta Ecológica número 2.
- Manifiesto de entrega, transporte y recepción de residuos peligrosos (DOF 3 de mayo de 1989). Gaceta Ecológica número 2.
- Manifiesto para casos de derrame de residuos peligrosos por accidente (DOF 3 de mayo de 1989). Gaceta Ecológica número 2.
- Reporte semestral de residuos peligrosos recibidos para reciclaje o tratamiento (DOF 3 de mayo de 1989). Gaceta Ecológica número 2.
- Reporte mensual de residuos peligrosos confinados en sitios de disposición final (DOF 3 de mayo de 1989). Gaceta Ecológica número 2.
- Reporte semestral de residuos peligrosos enviados para su reciclo, tratamiento, incineración o confinamiento (DOF 3 de mayo de 1989). Gaceta Ecológica número 2.
- Manifiesto para empresas generadoras eventuales de bifenilos policlorados (BPCs). Gaceta Ecológica número 11 (Noviembre 1990).

2.4 CRITERIOS INTERNACIONALES PARA LA SELECCIÓN DE DOMOS SALINOS PARA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

Los criterios comúnmente empleados para determinar la mejor ubicación de las instalaciones de disposición final de los residuos peligrosos incluyen variables tales como:

- La proximidad del sitio a las áreas donde existan asentamientos humanos.
- La probabilidad de que los contaminantes migren a una fuente subterránea de agua potable (en función de la permeabilidad del suelo y otros factores geológicos).
- La probabilidad de que ocurra una inundación o un terremoto que dañen la integridad del sitio.
- La seguridad de las rutas de transporte (protección de los terrenos ambientalmente sensibles).
- En ocasiones también se incluyen variables relacionadas con la seguridad y la disponibilidad de los servicios, accesos y mercados potenciales de servicio.

⁵ Iniciales del Diario Oficial de la Federación.

A pesar de que estos criterios se aplican con el mismo fin, la naturaleza de su clasificación y evaluación varía ampliamente. En la tabla 2.1 se presentan los criterios de exclusión recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que deben ser tomados en consideración para seleccionar los sitios adecuados para establecer la infraestructura para la disposición de residuos peligrosos.

Tabla 2.1 Factores de exclusión recomendados por la OMS para la selección de sitios orientados al manejo de residuos peligrosos.

<ul style="list-style-type: none">● <i>Suelos Inestables o débiles: suelo orgánico, arcilla suave o mezcla de arcilla y arena, suelos que pierden fuerza al compactarse o al mojarse, arcillas con la característica de encogerse o hincharse, arenas propensas a hundimiento y a la licuefacción.</i>● <i>Hundimientos: debido a la presencia de minas en el subsuelo, pérdida de humedad del suelo, presencia de aceite, gas o subsuelo propenso a disolución.</i>● <i>Suelos saturados: pantanos o áreas costeras.</i>● <i>Zonas de recarga de agua subterránea.</i>● <i>Zonas de inundación: como aluviones, zonas costeras o ribereñas, con una recurrencia de inundación cada 100 años o menos, así como áreas que fueron parte de cauces de ríos. (Aunque históricamente no se haya presentado escurrimiento alguno).</i>● <i>Cuerpos de agua superficial: sitios aguas arriba de un cuerpo receptor o una toma para el suministro de agua potable o para la agricultura, y donde el transporte es tan inmediato que no permite mitigar los impactos del derrame.</i>● <i>Condiciones atmosféricas que podrían impedir la dispersión de descargas accidentales.</i>● <i>Peligros naturales importantes: derrumbes, actividad volcánica, perturbación sísmica (de por lo menos 7 en la escala de Mercalli).</i>● <i>Recursos naturales: hábitat de especies en peligro de extinción, parques, zonas ecológicas, bosques y áreas naturales protegidas.</i>● <i>Terrenos selváticos o de agricultura, o bien de importancia económica o cultural.</i>● <i>Sitios históricos, estructuras y sitios de importancia arqueológica o bien lugares destinados al ejercicio de ciertas tradiciones. La intención es evitar no solamente el daño o la contaminación, sino también la intrusión física o visual.</i>● <i>Sitios vulnerables: como aeropuertos, estaciones de carga marítima, centrales de transporte terrestre.</i>● <i>Sitios de alto riesgo: como almacenamiento de materiales inflamables o explosivos.</i>● <i>Estructuras vulnerables: hospitales, reclusorios y centros de readaptación.</i>
--

Fuente: extraído de Consejo coordinador Empresarial - Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos A. C., 1998.

En la tabla 2.2 se presentan algunos de los criterios considerados por la Junta de Trabajadores Metropolitana de Melbourne (MMBW por sus siglas en inglés) para establecer la propuesta general de la Agencia de Protección Ambiental del Estado de Victoria. Los criterios se definieron identificando aquellos que pudieran ser más comunes para cualquier tipo de tecnología empleada, así como aquellos que pudieran tener cierta relevancia para las tecnologías específicas (incineradores, recuperación de solventes y aceites, rellenos sanitarios, tratamiento de líquidos, depósitos de almacenamiento y estaciones de transferencia).

Tabla 2.2 Criterios de la MMBV para la ubicación de sitios adecuados para establecer infraestructura para el manejo de residuos peligrosos.

Criterios de exclusión	Características de los criterios de preferencia
<p><i>Topografía.</i> No en pendientes mayores al 10%</p>	<p>Pendientes menores a 5%</p>
<p><i>Suelos Superficiales.</i> No dentro de áreas donde el hundimiento es evidente o en áreas de suelos inestables, donde el movimiento es un evento periódico.</p>	<p>Degradación estable de la estructura roca/suelo.</p>
<p><i>Condiciones atmosféricas.</i> (Criterios específicos según la zona que se trate)</p>	<p>Áreas donde los vientos son capaces de dispersar rápidamente las emisiones/olores. Áreas a favor del viento proveniente de áreas habitacionales o de áreas ecológicamente sensibles.</p>
<p><i>Valor recreacional.</i> No dentro de parques regionales, áreas declaradas como reservas de recreación, reservas para acampar o reservas deportivas.</p> <p><i>Densidad poblacional.</i> No dentro de áreas de vivienda, de áreas loteadas para desarrollo residencial, de desarrollo de villas o municipio, o de desarrollo residencial rural.</p>	<p>Áreas exteriores alejadas de parques futuros o reservas.</p> <p>Densidad poblacional baja. Dentro de áreas industriales de trabajo intenso. Áreas con un número pequeño de propietarios.</p>
<p><i>Suministro de Agua.</i> No dentro de áreas de captación para el suministro de agua o en áreas que son significativas para captar agua en el futuro. No dentro de las zonas identificadas para la recarga de acuíferos, usados para riego o para suministro de agua potable.</p>	<p>Nivel del manto freático: no superficial. Calidad del agua subterránea: baja.</p>

Fuente: extraído de Consejo coordinador Empresarial - Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos A. C., 1998.

En la tabla 2.3 se presentan los factores considerados para definir la ubicación de los sitios de confinamiento de residuos peligrosos en los Estados Unidos de Norteamérica. La importancia de los diversos factores de localización de los sitios depende mucho de las condiciones físicas, sociales y económicas del mismo, por lo que se tendrán que realizar ciertos arreglos estratégicos críticos, tales como minimización de la distancia del transporte hacia las instalaciones de control contra la optimización de la conveniencia hidrogeológica del sitio.

Tabla 2.3 Factores para definir la ubicación de los sitios de confinamiento de residuos peligrosos en Estados Unidos de Norteamérica.

Factor	Condiciones Deseables	Condiciones inaceptables
Consideraciones Geológicas		
Profundidad del manto acuífero	> 15,24 m (50 ft)	< 9,14 m (30 ft)
Característica litológica	Areniscas no perturbadas muy finas: (cuencas sedimentarias).	Rocas carbonizadas, fracturadas o agrietadas; también cualquier roca fracturada unida.
Sismicidad	Zonas de riesgo sísmico 0 - 1	Zona de riesgo sísmico 3.
Tectónica	Más de 1 609 m (1 milla) de la falla activa.	Menos de 1 609 m (1 milla) a la falla activa.
Características únicas	-----	De importancia arqueológica o paleontológica.
Consideraciones Fisiográficas		
Localización	Altiplanicie; banco de arcilla.	Suelos bajos húmedos, aluvión: banco profundo o presa; banco de arena y grava.
Relieve	Plano - ligeramente ondulado.	Adyacente - taludes inclinados. Pendientes mayores a 25%
Suelos		
Profundidad	> 1,02 m (40 in)	< 0,254 m (10 in)
Textura	Cieno a marga.	Arcilla muy fina.
Drenaje	Moderado.	Muy pobre.
Nivel de infiltración	1,52 – 5,08 cm/h (0,6-2,0 in/h)	<1,52 cm/h o >5,08 cm/h (< 0,6 in/h o >2,0 in/h)
Materia orgánica	1%	> 8%
Pendiente promedio	2-12%	> 25%
Consideraciones Hidrológicas		
Drenaje	Materiales de drenaje rápido; superficie seca.	Arcilla pesada o materia orgánica; área propensa a inundación o estancamiento.
Agua superficial	Valle plano o terracerías lejos de la corriente.	Valle plano cerca de la corriente; escurrimiento de 100 años de recurrencia.
Distancia	> 914 m (3 000 ft) del lago, marisma. > 61 m (200 ft) de una corriente.	A 610 m (2 000 ft) de cualquier cuerpo de agua superficial, a 8,05 km (5 millas) del límite de la cuenca.
Agua subterránea	No hay indicación de nivel freático superficial.	Filtración, manantiales, marismas, vegetación freática.
Acuífero	Roca de fondo profunda con capa impermeable.	Acuíferos poco profundos: cubierta delgada y permeable.
Fuente de suministro de agua	914 m (3 000 ft)	610 m (2 000 ft)
Consideraciones Climatológicas		
Precipitación	Evaporación 0,102 m/mes (4 in/month) mayor a la precipitación.	La precipitación excede la evaporación.
En caso de tormenta	Baja frecuencia de presencia de vientos y tormentas severas.	Dentro de la trayectoria de tornados o huracanes importantes.
Viento	Buena mezcla atmosférica.	Centro de la población comprendido en la zona de aire estático.
	No hay centros de población en dirección a favor del viento.	Centro de población a 805 m (0,5 millas) en favor del viento.
Consideraciones de Transporte		
Servicios públicos	> 305 m (1 000 ft)	< 305 m (1 000 ft)
Distancia a camino federal	> 610 m (2 000 ft)	< 610 m (2 000 ft)
Disponibilidad	Bajo riesgo de desborde en las rutas de transporte.	
Consideraciones del Medio		
Uso de suelo	No adyacente a tierra de cultivo en uso activo.	Parques que lo rodean, áreas recreativas, áreas desérticas, refugios de fauna, o ríos pintorescos.
Consideraciones del Medio Ambiente Humano		
Demografía	Baja densidad poblacional.	Rodeando a áreas culturales, reservaciones indias, o fronteras internacionales; a 805 m (0,5 millas) de pozos de agua potable; a 1,609 km (1 milla) en dirección de la toma de corriente en las aguas que fluyen.
Consideraciones Biológicas		
Ecología	De escaso valor ecológico; baja diversidad y en originalidad de especies.	Hábitat para especies raras o en peligro de extinción.

Fuente: Cheremisinoff, 1990, citado en Consejo coordinador Empresarial - Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos A. C., 1998.

La tabla 2.4, refiere las distancias en diferentes estados de Canadá y Estados Unidos de Norteamérica, requeridas entre las instalaciones para el manejo de residuos peligrosos y los asentamientos humanos de referencia.

Tabla 2.4 Distancias⁽¹⁾ de separación entre instalaciones residenciales y públicas a los sitios⁽²⁾ para disposición de residuos peligrosos en Estados Unidos de Norteamérica y Canadá.

Estado	Tipo de Instalación	Distancia, (m)	Tipo de Propiedad
California	Relleno	609	Residencias
Delaware	-----	457	Residencias
Idaho	Relleno	1 524 4 800	Residencias Escuela, iglesia, hospital
Manitoba	-----	200	Residencias Hospital
Michigan	Relleno	150	Residencias
Mississippi	-----	305 800	Residencias Escuela, hospital
New Hampshire	-----	305 914	Residencias Escuela, hospital
New Jersey ⁽³⁾	Relleno Otro	609 800	Residencias Residencias
North Carolina	-----	400	Escuela, iglesia
Ohio ⁽⁴⁾	-----	609	Residencias Escuela, hospital
Ontario	Tratamiento	400 1 000	Residencias Instalación pública
Oregon	Relleno -----	304 1 600	Escuela, iglesia Rural, residencias
Texas	-----	152	Residencias, escuela, iglesia
Washington	-----	609	Residencias, escuela, iglesia

(1) La literatura no especifica si la medida se toma de los límites del sitio o de su centro, no obstante, por lo general se refiere al límite de propiedad de una residencia, etc.
 (2) Se refiere en general a instalaciones con residuos peligrosos, a menos que sea especificado de otra manera.
 (3) Residencias se refiere a una estructura usada rutinariamente por más de 12 horas al día.
 (4) Se refiere a residuos peligrosos agudos.

Fuente: Manitoba Hazardous Waste Management Corporation, 1988; Temple, Baker & Sloane Ltd., 1987.

2.5 CRITERIOS MEXICANOS PARA LA SELECCIÓN DE DOMOS SALINOS PARA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

El Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en su Título Primero define al confinamiento en formaciones geológicamente estables, como aquella “obra de ingeniería para la disposición final en estructuras naturales o artificiales, impermeables, incluyendo a los domos salinos que garanticen el aislamiento ambientalmente seguro de los residuos peligrosos”. El Artículo 51 Fracción IV, del Título Cuarto, Capítulo III del Reglamento, indica que para la construcción y operación de una instalación de disposición final de residuos peligrosos se anexará el estudio de vulnerabilidad del sitio, el cual contendrá:

- a) La geología regional y local del sitio.
- b) La climatología e hidrología superficial del sitio.
- c) El estudio de hidrología del sitio.
- d) El estudio de geofísica del sitio.
- e) La estimación de la migración potencial de los contaminantes al agua subterránea.
- f) La determinación del grado de protección del acuífero
- g) La determinación de los riesgos asociados a los residuos y materiales presentes en la operación del confinamiento controlado, probabilidades de ocurrencia de accidentes, los radios potenciales de afectación y las zonas de seguridad.

- h) La definición de recomendaciones para disminuir el riesgo asociado a la operación del confinamiento controlado.
- i) La determinación del riesgo a instalaciones e infraestructura del confinamiento y de las zonas vecinas por fugas, incendios y explosión.
- j) La determinación del riesgo hidrológico por precipitación, inundación y corrientes superficiales.
- k) El estudio y los resultados de mecánica de suelo y subsuelo del sitio.
- l) La determinación del riesgo geológico por fallas, sismos y deslizamientos.
- m) La determinación de lixiviados de los residuos estabilizados.
- n) La determinación, movilidad, persistencia y toxicidad de los contaminantes o componentes críticos de los residuos estabilizados para los ecosistemas.
- o) La determinación de los factores específicos al sitio que influyen en la exposición y dispersión de los contaminantes en aire, agua y suelo.
- p) La determinación y categorización de los puntos, rutas y vías de exposición presentes y futuras.
- q) La determinación de las poblaciones receptoras más vulnerables.
- r) La determinación de los valores de las dosis de referencia para los contaminantes o componentes críticos no cancerígenos y de los índices de riesgo para el caso de efectos adversos cancerígenos.
- s) La determinación de los índices de peligrosidad para el caso de efectos adversos no cancerígenos y los índices de riesgo para el caso de efectos adversos cancerígenos.
- t) El cálculo de la exposición total para los grupos poblacionales presentes más vulnerables para las distintas rutas y vías de exposición.
- u) La determinación de las posibles consecuencias o efectos adversos a la salud humana y al medio ambiente de los riesgos evaluados que se desprenden de la presencia de los contaminantes o componentes críticos.

La Norma Oficial Mexicana NOM-145-SEMARNAT-2003, relativa al confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables, indica las características del sitio para la construcción de confinamientos en domos salinos geológicamente estables. Dentro de las características geológicas y geofísicas se indica que:

“No debe haber presencia de fallas geológicas activas a menos de 1 000 m radiales del sitio. De acuerdo a las propiedades litológicas de los estratos localizados sobre el cuerpo del domo, éstos no deben permitir la migración de fluidos provenientes de la operación del confinamiento, a los acuíferos. Se deben conservar los registros geofísicos que se tomen del pozo, durante la construcción del pozo, su operación y por los 20 años posteriores al cierre del confinamiento, así como su interpretación cualitativa y cuantitativa; éstos deben precisar los espesores de las formaciones y las relaciones de contacto de los estratos. El espesor del domo salino donde se ubicará la cavidad debe ser de 1 000 m como mínimo en sus tres dimensiones, de acuerdo a estudios geofísicos de detalle. La presencia en el domo salino de otros elementos y compuestos químicos diferentes a la sal, solubles e insolubles, no debe ser mayor al 10%, ni registrar horizontes de más de 5 m”.

En las especificaciones hidrológicas se aclara que:

“El sitio deberá ubicarse fuera de zonas con avenidas extraordinarias con un periodo de retorno de 100 años el cual deberá ser delimitado con un ajuste estadístico. El sitio debe estar alejado en desnivel 20 m hacia arriba del cauce de corrientes, de acuerdo a las condiciones hidrológicas que presente el terreno; también el área seleccionada deberá tener una relación de precipitación-escurrimiento menor a 10 m³ como promedio anual. De no cumplirse lo anterior, se deben realizar las obras civiles de drenaje necesarias para cumplir esta condición”.

En lo referente a las especificaciones climáticas se establece que:

“Los vientos dominantes no deben tener trayectoria hacia las poblaciones cercanas”.

De igual forma, se aclara que las instalaciones a nivel de tierra no se deben construir en Áreas Naturales Protegidas, ni en zonas clasificadas como urbanas.

Debe hacerse notar que los tres criterios más importantes establecidos por la NOM-145-SEMARNAT-2003 son aquellos que previenen el movimiento de fluidos producidos en la operación del sitio de confinamiento de los residuos hacia los acuíferos, que los vientos dominantes no se deben dirigir hacia poblaciones cercanas, y que establece la calidad de los residuos estabilizados a ser confinados. También establece los procedimientos para supervisar los acuíferos y suelos adyacentes. La calidad de agua debe supervisarse antes de la construcción y en intervalos mensuales cuando el sitio está en la operación. Si las características fisicoquímicas de los acuíferos se diferencian de aquellos antes de que el sitio existiera, o los cambios de los registros indican la presencia de elementos contaminantes, inmediatamente se debe suspender la operación y se debe informar a la Comisión Nacional del Agua.

CAPITULO III. LOS DOMOS SALINOS

3.1 GENERALIDADES SOBRE LOS DOMOS SALINOS

Las estructuras salinas más conocidas son los *domos salinos* y se definen como una columna con núcleo de masa salina rodeada de material sedimentario estratificado. Los domos salinos son estructuras que se formaron por procesos tectónicos. Frecuentemente las aguas en evaporación depositan anhidrita (CaSO_4), si subsecuentemente se agrega agua, ésta se convierte en yeso, lo cual aumenta su volumen un 40%, si los estratos son horizontales, la expansión tiene lugar hacia arriba, por lo tanto los estratos se dilatan pero no forman pliegues. No obstante, si gran parte de la expansión es horizontal, se originan fuerzas compresivas, que producen plegamientos de unos pocos milímetros o como máximo de pocos metros. Si se disuelven estratos subhorizontales de sal o de alguna otra roca, las formaciones superyacentes se hundirán irregularmente formando cuencas o domos. (López R., 1983)

Los domos salinos son importantes porque ofrecen ejemplos magníficos del comportamiento plástico de las rocas y el efecto que producen en rocas más rígidas. Las masas salinas se conocen por las perforaciones realizadas en busca de azufre y/o petróleo, y se componen principalmente de cloruro de sodio (NaCl) en forma de halita y de algunas impurezas entre las que se encuentran la anhidrita, el yeso y el carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de caliza. Las masas salinas generalmente tienen espesores considerables, como lo demuestran las perforaciones hechas en busca de azufre y acumulaciones de petróleo, pues se ha atravesado profundidades de más de 2 500 m. Lo anterior se puede observar en la figura 3.1, en la cual se nota la presencia de yacimientos de azufre, petróleo y gas asociados a un domo salino. (*Op. Cit.*)

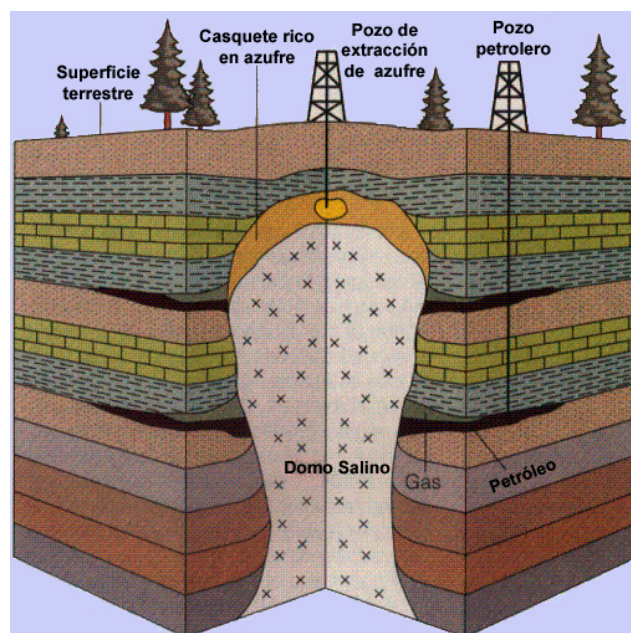


Figura 3.1 Domo salino y recursos naturales valiosos asociados.

Fuente: <http://www.saltinstitute.org/12.html>

Las extensiones de estas rocas son considerables, aunque son relativamente pequeñas desde el punto de vista geográfico, se depositan en cuencas cerradas en las que se han concentrado tanto el agua de mar como la de los ríos, la evaporación de estas aguas es intensa hasta llegar a la concentración necesaria para que las sales solubles se precipiten. Para llegar a tener grandes espesores se tiene que considerar un sumergimiento del fondo de la cuenca cerrada y una velocidad de depósito proporcional a la formación de las sales. Una vez que se tienen en la cuenca espesores de sal más o menos grandes, pueden variar las condiciones ambientales y en consecuencia también hay un cambio en el tipo de sedimentos, depositándose sedimentos clásticos de espesor variable que pueden llegar a ser de más de 3 000 m. Como resultado de los movimientos tectónicos isostáticos la masa salina fluye para producir diferentes tipos de estructuras, ya que la densidad de la sal no es superior a 2,2 que es más baja que la de las rocas superyacentes. (*Op. Cit.*)

3.2 ORIGEN DE LOS DOMOS SALINOS

Los domos salinos son grandes formaciones, casi homogéneas, de cloruro de sodio (NaCl), aunque pueden contener zonas no homogéneas. Pfeifle *et al.* (1995) informaron que el contenido típico de anhidrita (CaSO₄) en los domos salinos de la costa del Golfo de México es, en promedio, menor del 5%. Se sabe que hay más de 500 domos salinos subterráneos conocidos en la región de la costa del Golfo de México que va desde el estado de Yucatán, México, hasta el estado de Florida, Estados Unidos de Norteamérica, como se muestra en la figura 3.2. Los domos salinos fueron creados por los procesos geológicos que sucedieron durante millones de años (Chilingarian *et al.*, 1989). La evolución de un diapiro⁶ de sal se muestra en la figura 3.3. A causa de su baja densidad, la sal fluyó hacia arriba para formar diapiros, bancos, pilares y otras estructuras de cubierta aguda. Como la sal es menos densa, comparada con los sedimentos circundantes, y dado que la sal puede fluir a temperaturas y presiones más altas, estos domos de sal empujan y suben por los sedimentos casi hasta la superficie. Estos domos de sal están formados principalmente del mineral halita y sirven como un recurso valioso para varias industrias. Cuando la sal pasa por encima de los sedimentos de recubrimiento, se desarrollaron proyecciones largas, parecidas a un dedo. (Tomasko, 1997; Schlumberger, 2005; Solution Minig Reseach Institute, 2005)

El origen de domos salinos se explica mejor con la teoría de flujo plástico. La sal en condiciones estándar tiene una densidad de 2,2. Pero a una profundidad de aproximadamente 3 660 m (12 000 ft aproximadamente), la masa de los sedimentos que la cubre ejerce una fuerza compresiva hacia abajo, la densidad disminuye y la sal comienza a fluir como una sustancia plástica. Una pequeña fractura en los sedimentos del estrato superior, sedimentos de densidad mayor o una masa ligeramente superior por encima de su entorno provocaría el movimiento ascendente de la sal. Una vez que comienza este movimiento ascendente, la sal en cualquier otra parte de los estratos de sal se mueve en la región que rodea a la estructura salina para sustituir a la sal que fluye hacia arriba para formar el domo salino. El movimiento ascendente del domo salino sigue mientras haya una fuente suficiente de sal “alimentada” al domo o hasta que el movimiento ascendente sea detenido por una formación más rígida. Una vez que se alcanza el equilibrio el movimiento ascendente del domo salino cesa, pero puede comenzar otra vez si se añade una sobrecarga lo suficientemente pesada, la cual aumenta otra vez la carga de presión sobre la masa parental de sal. (Hanson, 1999)

Frecuentemente junto con los minerales, el petróleo quedaba atrapado bajo el borde de la capa de roca, tal como se muestra en la figura 3.4. Debido a la alta probabilidad de encontrar petróleo y otros minerales valiosos, los domos salinos se han explorado y extraído extensamente durante más de 100 años (Tomasko, 1997). Comenzando a finales de los años 1800s, los domos salinos fueron excavados comercialmente en busca de sal usando varias técnicas de lixiviación. Las formas de las cavernas resultantes a menudo eran irregulares debido a las técnicas aplicadas, pero un conjunto de cavernas, tales como el West Hackberry Cavern 11, son casi simétricas (Tomasko, 1985).

⁶ Domos o pliegues de anticlinal cuyas rocas que las cubren se han roto por la compresión del corazón de sal más plástico.

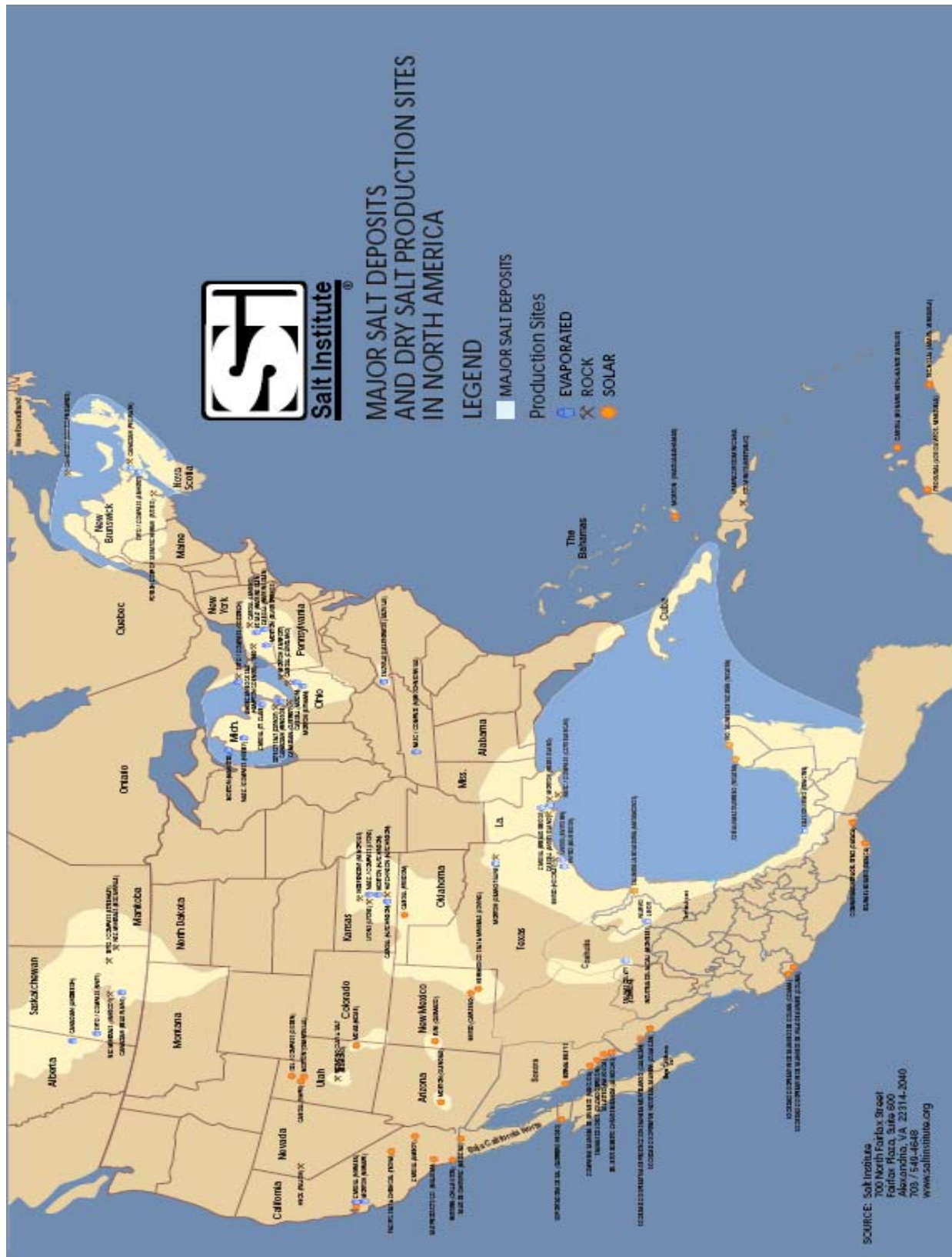


Figura 3.2 Principales depósitos de sal y sitios de producción de sal en Canadá, Norteamérica y México. (Zonas iluminadas)

Fuente: Salt Institute, 2005.

Evolución de un diapiro de sal



Figura 3.3 Evolución de un diapiro de sal.
Fuente: Schlumberger, 2005.

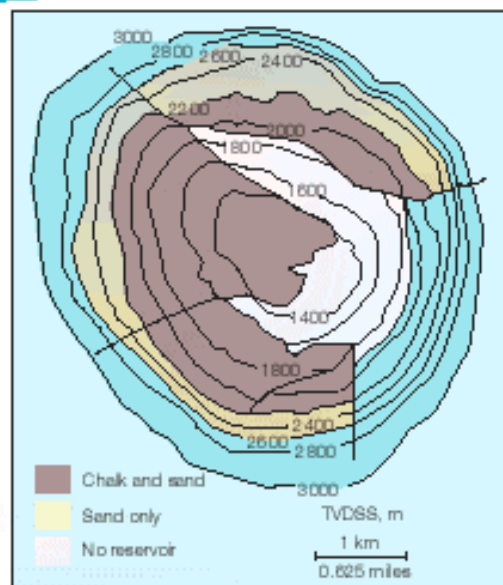
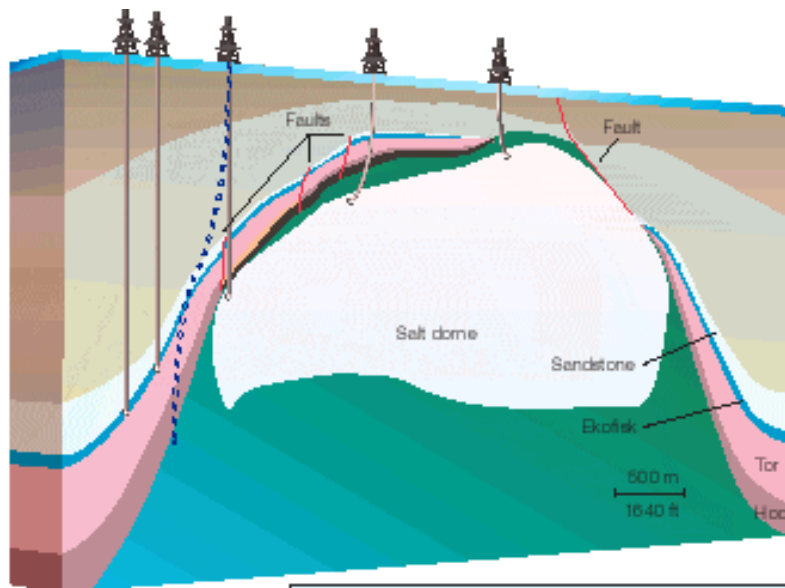


Figura 3.4 Sección transversal y curvas de nivel de un domo salino.
Fuente: Schlumberger, 2005.

La profundidad de la sal incrustante puede ser mayor de 305 m (Whiting, 1981), y el ancho superior de los domos de sal está en el rango de 805 a 4 023 m aproximadamente (Chilingarian *et al.*, 1989). Si la sal incrustada entrara en contacto con agua no saturada, ocurriría una disolución. A menudo se formaba una capa de roca (casquete) por medio de una interacción compleja de disolución, recristalización, hidratación de la anhidrita para formar yeso, reducción de sulfato, cementación, etcétera. Aunque las capas de roca son comunes en los alrededores de los domos salinos, éstas no siempre existen (Linn, 1997, citado por Tomasko, 1997). Con frecuencia se desarrolla en lo alto del casquete una región de roca caliza; esta caliza pudo haberse formado por un conjunto de procesos, incluyendo la reducción del sulfato de calcio de la capa de roca y la precipitación del sulfato rico en calcio del agua (Werner, 1986).

Para crear las cavernas de sal se inyecta agua que no esté totalmente saturada de sal dentro de una bolsa de sal y la solución de salmuera resultante se retira. Este método se menciona como minería de solución o disolución (Testa, 1994). Después de un año o más, se puede llegar a formar una caverna cuya capacidad puede estar entre los 10 000 y 1 000 000 m³. Algunas de las cavernas formadas mediante minería de disolución se muestran en la figura 3.5 (Bérest y Brouard, 2003). Tanto el desarrollo como la forma de la caverna de sal se pueden controlar con el método empleado para su construcción. En el método de circulación directa, el agua “dulce” se inyecta por una tubería instalada desde la superficie, y la salmuera se retira por un espacio anular entre la tubería y la cubierta final. En el método de circulación inversa, el agua “dulce” entra por el espacio anular, y la salmuera se retira por la tubería exterior. Se puede usar una combinación de estos dos métodos, u otros métodos más complicados, para obtener la forma de caverna deseada (Tomasko, 1997).

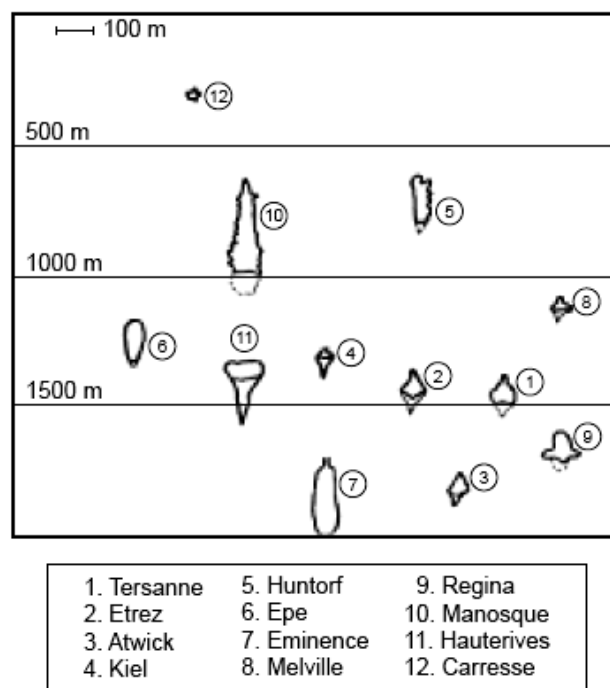


Figura 3.5 Cavernas de minería de solución.

Fuente: Bérest y Brouard, 2003.

Debe aclararse que las cavidades salinas desarrolladas por minería de extracción de sal de roca son muy diferentes de las cavidades desarrolladas por operaciones de minería de disolución, tanto en condiciones de operación como en el control y monitoreo que se puede tener de los residuos almacenados en ellas. Las cavidades desarrolladas por minería de extracción de sal de roca siguen los métodos convencionales de la minería subterránea, explotando la sal directamente por medio de maquinaria y dejando cavidades vacías después de la extracción del material; dichas cavidades se deben rellenar por razones de estabilidad, para lo cual es posible utilizar diversos materiales o residuos previamente estabilizados. Una cavidad desarrollada mediante operaciones de minería de disolución, es aquella en la que la sal se

explota por medio de la inyección de agua a presión a través de una tubería que va hacia el interior del domo salino, donde se disuelve la sal y de esta forma se desarrolla gradualmente una cavidad, mientras que por otra tubería (concéntrica a la tubería de inyección) se extrae la salmuera; la cavidad debe permanecer llena una vez que se termina de explotar el recurso, ya sea con salmuera o gas a presión, para evitar que el domo se colapse. Debido a esta situación, al momento de inyectar residuos en la cavidad salina, éstos se van depositando en su interior desplazando a la salmuera o al gas comprimido que fluye al exterior por medio de la tubería concéntrica antes mencionada. Otra diferencia importante es que las cavidades creadas por minería de disolución deben estar permanentemente presurizadas lo cual implica escenarios de riesgo muy diferentes a los de las cavidades desarrolladas por minería de extracción de sal de roca.

De acuerdo con Leith (2001), los países en los que se ha usado la tecnología de disolución de la sal para construir cavernas subterráneas en domos salinos son:

Alemania	España	Polonia
Bélgica	Estados Unidos de Norteamérica	Portugal
Brasil	Francia	Reino Unido
Bulgaria	Italia	Rumania
Canadá	Kazajstán	Rusia
China	Marruecos	Suiza
Dinamarca	México	Tailandia
Eslovaquia	Países Bajos	Turquía

3.3 TAMAÑO, FORMA Y COMPOSICIÓN DE LOS DOMOS SALINOS

Existen masas de forma estructural que no pueden llamarse domos. Los domos salinos son de sección aproximadamente circular con diámetros en la parte columnar desde menos de 1 km hasta más de 8 km, además cuentan con su casquete correspondiente. El espesor de las columnas de sal en los flancos es bastante considerable, del orden de 3 000 m en adelante, sabiéndose por exploración sísmológica, principalmente de reflexión, que estas columnas de sal pueden tener espesores de más de 5 000 m. La forma de los domos es algo variable, algunos son de sección más o menos circular o elíptica, por la parte superior en contacto con los sedimentos más o menos aplanados; otras veces la parte superior es de forma cóncava, pueden tener también formas más regulares, pero con recumbencia en la columna, en ocasiones la columna está ampliada en la parte superior en forma de hongo. Por efecto de los sedimentos adyacentes o superyacentes los domos pueden ser de dos tipos: (López R., 1983)

1. Penetración de diapiros.
2. De combamiento o arqueamiento.

Los primeros son aquellos en los que la masa salina ha perforado o atravesado, en su carrera ascendente, a los sedimentos (figura 3.6-A). Los segundos son los que han arqueado, más o menos fuertemente, a los sedimentos sin perforarlos (figura 3.6-B).

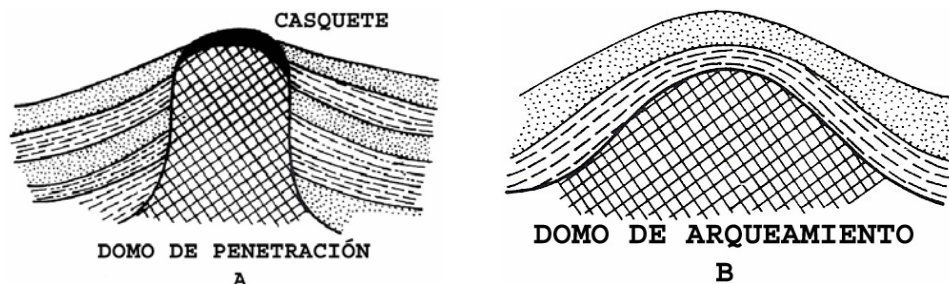


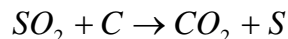
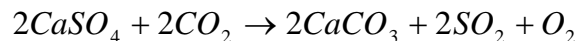
Figura 3.6 Tipos de domos salinos. A) De penetración. B) De arqueamiento.

Fuente: López R., 1983.

Las partes en que se divide un domo salino son las siguientes:

1. La masa salina de donde proviene la columna de sal propiamente dicha.
2. La cubierta de depósitos químicos, cap-rock o casquete.

El cap-rock o casquete está formado por anhidrita en contacto directo con la sal, el yeso y la caliza, los espesores del cap-rock son pequeños y del orden de 100 m. Muchas veces está cubierto por depósitos químicos asociados al azufre, el cual se cree que fue formado por la reducción del sulfato de calcio (CaSO_4) por materia húmica u orgánica (C); según las reacciones siguientes: (*Op. Cit.*)



Los domos salinos pueden llegar a reflejarse en la superficie por el arqueamiento de los sedimentos al moverse la masa salina encontrándose algunas ocasiones relieves topográficos locales más o menos redondeados. Los estudios de foto interpretación o de imágenes, han delineado en ocasiones el emplazamiento de domos que eran desconocidos (figura 3.7).



Figura 3.7 Vista aérea de la zona de domos salinos Leaf-Hill.

Fuente: <http://unrnet.seismo.unr.edu/Aerials/part3.html>

Otras veces se reflejan por la sal que ha aflorado, por cambios de vegetación o cuando afloran rocas más antiguas que los sedimentos de la superficie. Cuando no se expresan superficialmente los domos, se localizan por métodos indirectos, siendo los principales:

1. Método sísmico tanto de reflexión como de refracción.
2. Método gravimétrico. Este puede notar la masa salina por la diferencia de peso específico. Su expresión es generalmente un mínimo gravimétrico.

La sección que tienen los domos salinos es muy variada según se ven en la figura 3.8.

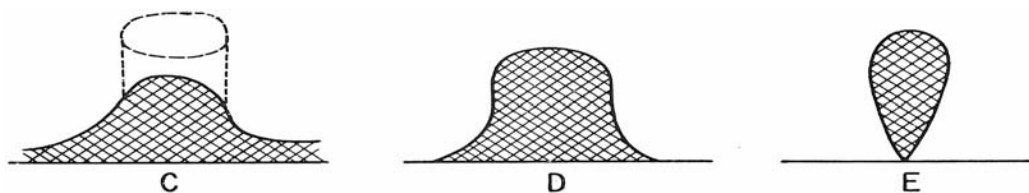


Figura 3.8 Secciones comunes de los domos salinos.

Fuente: López, 1983.

Su sección horizontal generalmente es circular, otras veces elíptica y generalmente está asociada con sistemas de fallamientos los cuales pueden presentar fallas radiales, o bien, fallas paralelas. Estas fallas siempre son de tensión, o sea normales, y muy a menudo se encuentran sobre todo en las de tipo paralelo. (López R., 1983)

En los domos salinos de arqueamientos, al curvarse los sedimentos se producirán alargamientos de las capas, consecuentemente los de la parte superior se desplazarán hacia abajo debido a la acción de la gravedad, también se considera que para formar el cap-rock sobre la columna salina es necesario una solución de las masas salinas por aguas percolantes, es decir, una disminución del volumen, el cual será ocupado por los sedimentos sobre la masa salina originándose asentamientos que forman las fallas por gravedad. (*Op. Cit.*)

3.4 USOS DE LAS CAVIDADES SALINAS

3.4.1 Primeros usos de las cavidades salinas

Durante mucho tiempo se ha extraído la sal para su consumo y preservación de los alimentos (Kostick, 1992; Moiner, 1992). La minería subterránea de la sal en Austria y Rumania pudo haber comenzado en la Nueva Edad de Piedra (Baar, 1977). En contraste, el empleo de cavidades subterráneas formadas por disolución de la sal comenzó desde hace cinco o seis décadas y media (Bays, 1963). El almacenaje tanto de líquidos como de gases en cavernas formadas por disolución de sal fue concebido, primeramente en Canadá a principios de los años 1940s, durante la segunda Guerra Mundial (Bays, 1963). El almacenamiento del gas licuado de petróleo (butano, etano, propano, etc.), también conocido como gas LP, y otros hidrocarburos ligeros, en las cavernas salinas, se extendió rápidamente a principios de los años 1950s en Norteamérica y varios países de Europa. El almacenamiento de petróleo crudo, ocurrió primero en Inglaterra, a principios de los años 1950s, durante la Crisis de Suez (Koenig, 1994; Griffiths y Woynilloicz, 2003). Desde hace una década al almacenamiento de gas natural le siguió el almacenamiento de hidrocarburos líquidos en Norteamérica y Canadá (Thoms y Gehle, 2000). Actualmente en Francia existen más de 1 000 cavidades salinas en las que se almacenan hidrocarburos (Bérest y Brouard, 2003).

La disposición de residuos en cavernas salinas comenzó al principio como un método local, conveniente para desechar subproductos de las plantas industriales cercanas que utilizaban salmuera como materia prima. Actualmente una cantidad de residuos son dispuestos en cavernas salinas, sin embargo la disposición de desechos clasificados como peligrosos generalmente encuentra una fuerte oposición local (Thoms y Gehle, 2000). En el primer Simposio de la Sal, sostenido en 1962 en Cleveland, Ohio, en Estados Unidos de Norteamérica, se describió la tecnología de almacenaje en cavernas salinas, incluyendo el empleo del sónar (Bays, 1963; Meyers, 1963). Asimismo se presentó la conversión realizada en 1961, de una caverna de salmuera agotada para el almacenamiento de gas natural, la caverna Morton número 16, ubicada cerca de Marysville, Michigan, Estados Unidos de Norteamérica (Vance, 1963); este proyecto se ha citado como el primer sitio de almacenamiento de gas natural en una cavidad construida por disolución de sal (Allen, 1972). Sin embargo, en dicho Simposio, se indicó que las cavernas de sal también eran empleadas para el almacenamiento de gas natural en Hutchinson, Kansas, Estados Unidos de Norteamérica, y para el almacenamiento de gas "artificial" en Tes, Inglaterra (Gentry, 1963). También se mencionó que en las operaciones en aguas profundas, el gas LP se estaba almacenando en profundidades de 2 560 m (Branyan, 1963). En el segundo Simposio realizado en 1965, sostenido también en Cleveland, se describieron los métodos de minería para obtener mejorar la geometría de las cavernas (por métodos comenzados en 1961) (Remson *et al.*, 1967), así como la construcción de una caverna de almacenamiento horizontal de gas LP con una longitud de más de 120 m sobre una delgada capa de sal (Shock, 1967).

3.4.2 Usos comunes de las cavidades salinas

Las cavidades salinas básicamente constituyen aperturas subterráneas muy grandes que proporcionan una contención segura para los materiales que no disuelven a la sal. En general, los usos de las cavernas salinas pueden clasificarse como operaciones de disposición o de almacenaje. El almacenaje de hidrocarburos líquidos y gaseosos, y productos asociados, tuvo un éxito rápido, y sigue siendo el principal empleo de las cavernas de sal hasta hoy. La disposición de residuos y “subproductos” constituye el siguiente empleo más importante de las cavernas salinas (Thoms y Gehle, 2000). Las formaciones de sal y los depósitos de hidrocarburo, con las refinerías asociadas, ocurren a menudo en la misma área, tal es el caso de la región del Golfo de México y Norteamérica (Halbouty, 1979). En muchos domos salinos de estas regiones se ha practicado la minería, tanto para producir salmuera, que es la materia prima de algunas plantas químicas, como para proporcionar almacenamiento para los hidrocarburos. Al principio el almacenamiento se realizaba en los “pozos” de salmuera que se habían formado por disolución sin tener en consideración la posibilidad de emplearlos como sitios de almacenamiento cuando se terminara de explotar la sal. Esta práctica algunas veces causaba problemas posteriores en las operaciones de almacenamiento en cavernas de salmuera retroalimentadas. Los productores actuales de salmuera son más conscientes de las oportunidades potenciales de almacenamiento y, por lo tanto, emplean la minería de disolución controlada para extraer la sal mientras que le dan a las cavernas la geometría adecuada para el almacenamiento (Thoms y Gehle, 2000). El funcionamiento de estas cavidades constituye un caso exitoso para el almacenamiento en grandes cantidades de materiales sumamente volátiles. El almacenamiento de hidrocarburos ligeros, mediante el método de desplazamiento de salmuera (Katz y Lee, 1990), representa el primer y más extendido empleo de las cavidades salinas en todo el mundo. Los hidrocarburos ligeros incluyen al propano, butano, etano, etileno, gasolina natural, y otros productos extraídos de refinerías y el gas natural que es transportado y almacenado como si fuera un líquido (Gas Processors Association, 1997).

El petróleo crudo o petróleo no refinado, también se almacena en cavidades salinas compensadas con salmuera. La República Federal Alemana colocó su reserva estratégica de petróleo en el interior del domo salino Etzel cerca de Wilhelmshaven, entre 1971 y 1978, creando un volumen total de almacenamiento en la cavidad de 13 000 000 m³ (82 MMB⁷) (Blecker *et al.*, 1994); desde entonces varias de estas cavidades se han adaptado para almacenar gas LP. Estados Unidos de Norteamérica comenzó a llenar su reserva estratégica de petróleo en domos salinos en 1978, continuado a principios de los años 1990s para lograr un total de poco menos de 94 000 000 m³ (600 MMB) (Linn y Culbert, 1999). En 1981 un consorcio de compañías petroleras construyó el puerto petrolero costa afuera de Luisiana (LOOP por sus siglas en inglés), en Estados Unidos de Norteamérica (McCauley *et al.*, 1998); la reserva de petróleo del LOOP la proporcionan nueve cavernas situadas en el interior del domo salino Clovelly con un volumen total aproximado de 8 100 000 m³ (51 MMB) (Lolan *et al.*, 1998). Otros países que cuentan con reservas de petróleo en cavernas salinas se indican en la tabla 3.1, asimismo se listan datos sobre almacenaje de gas natural en cavidades salinas para algunos países en América y Europa.

En 1963 en Saskatchewan, Canadá, se construyeron algunas cavernas de sal diseñadas para almacenar gas a una profundidad de 1 128 metros. Este concepto se extendió a Norteamérica, en 1970, con la terminación de dos cavernas para almacenar gas en el domo salino de Eminence, en Mississippi, a una profundidad de entre 1 737 y 2 042 m (Branyan, 1963). Las cavernas de Eminence eran profundas y no compensadas por salmuera, de esta forma se incorporó el potencial de pérdida de gran volumen debido al arrastre de sal. En Francia, el almacenaje de gas en las cavidades salinas, comenzó en 1970 en el domo salino de Tersanne, a una profundidad de aproximadamente 1 400 a 1 500 m (Boucly, 1984). El almacenamiento de gas en el domo salino Honigsee, cerca de Kiel, Alemania, comenzó en 1971 a una profundidad de entre 1 307 y 1 335 m (Hellberg e Iversen, 1994). Los primeros residuos colocados en los domos salinos fueron, probablemente, residuos de las industrias locales a base de sal. Alrededor del año 1959, los desechos del álcali de la ceniza de soda de la producción local se depositaron en las cavernas ubicadas en el campo de salmuera Holford, localizado aproximadamente a 32 km al sur de Manchester, Inglaterra (Hoather y Challinor, 1994). Otros residuos similares de la industria de la sal, como los lodos de salmuera provenientes de la purificación de la salmuera, también se depositaron en las cavernas de

⁷ 1 MMB es un millón de barriles de petróleo, equivalentes a $1,59 \times 10^5$ m³.

Holford. Otro rasgo interesante del sitio de Holford, radica en hehecho de que los residuos orgánicos generados fuera del sitio se han depositado allí, desde el año 1968, en cavernas especialmente designadas por una sociedad formada por los operadores del campo de salmuera y una firma comercial de recolección de residuos (Thoms y Gehle, 2000).

Tabla 3.1 Almacenamientos existentes en cavidades salinas.

País	Hidrocarburos ligeros (1 000 m ³)	Petróleo crudo (1 000 m ³)	Gas natural (1 000 m ³)
Canadá	6 620,4 ^a	---	552 720 ^b
Dinamarca	---	---	X ^c
Francia	X	---	X ^d
Alemania	X	X	5 040,1 ^e
Irak	X	---	---
México	---	1 500 ^g	---
Marruecos	X	---	---
Polonia	---	---	143 000 ⁿ
Rusia	465 - 750	---	60 - 180 ⁱ
Estados Unidos de Norteamérica	85 221,2 ^a	102 100	3 423,5 ^b

(1 000 m³ = 6 289,8 bbl)

Símbolos:
 X Almacenamiento presente, datos incompletos.
 --- No se tienen datos sobre el almacenamiento.

Fuentes citadas por Thoms y Gehle, 2000:
 a Gas Processors Association, 1997.
 b American Gas Association, 1998.
 c F. Crotogno, KBB.
 d B. Brouard, P. Berest, École Polytechnique.
 e R. Rokahr, University Hannover.
 f M. Dussaud, SOFREGAZ U.S.
 g De Laguerie, GEOSTOCK.
 h K. Urbanczyk, CHEMKOP.
 i Rezunenko, et al., 1999.

Fuente: Thoms y Gehle, 2000.

En México hacia el año de 1985, se llevaron a cabo el acondicionamiento de dos cavidades en un domo salinos para almacenar 10 millones de barriles de crudo en el Istmo de Tehuantepec (CIESAS, 2005). Con los cambios en la reglamentación del gas LP, anunciados en el 2001, se abrió la posibilidad de almacenar el combustible en cavidades salinas subterráneas como las ubicadas en el domo salino de Tuzandépetl, Veracruz (Periódico El Universal Online, 2001). Para diciembre de 2005, se dio a conocer que Petróleos Mexicanos (PEMEX) comenzaría a realizar obras para almacenar 10 millones de barriles de petróleo crudo, en cavidades construidas por disolución en domos salinos (Periódico El Sol de México, 2005).

En Estados Unidos de Norteamérica las cavernas salinas se usan para la disposición de residuos de yacimientos petrolíferos; para el año 2000, el estado de Texas había permitido el uso de seis cavernas de sal para la disposición de residuos no peligrosos provenientes de los yacimientos petrolíferos, y una caverna para la disposición de materiales radiactivos de ocurrencia natural (NORM por sus siglas en inglés) (Veil et al., 1996; Veil et al., 1998). El potencial para la disposición de residuos químicos peligrosos en cavidades dentro de los domos salinos, se ha reconocido por las empresas de todo el mundo. Como se mencionó anteriormente, tanto los hidrocarburos líquidos como los gaseosos se han almacenado satisfactoriamente en cavidades salinas, construidas correctamente, durante décadas, y desde un punto de vista técnico, esto parecería calificar a las cavernas salinas para las operaciones de disposición de materiales con propiedades similares (Rolfs et al., 1992; Davidson et al., 1997). Sin embargo, en Estados Unidos de Norteamérica la solicitud para construir instalaciones de disposición de residuos peligrosos en las cavidades salinas, ha levantado mucho más objeciones que las solicitudes para construir instalaciones más tradicionales para la disposición de residuos peligrosos, tales como los rellenos sanitarios. La disposición de residuos peligrosos en domos salinos está rotundamente prohibida

en el estado de Louisiana, en Estados Unidos de Norteamérica, y las solicitudes para la disposición en cavernas salinas, en cualquier otra parte de ese país están sujetas a investigaciones muy largas (Thoms y Gehle, 1994; Brassow y Thoms, 2000).

Actualmente en Estados Unidos de Norteamérica y en Alemania, en las cavidades salinas construidas dentro de los domos salinos, se confinan residuos de la purificación de la salmuera, residuos de campos petroleros y residuos radioactivos. Adicionalmente, en Alemania se confinan los siguientes residuos peligrosos en cavidades geológicamente estables: desechos del lavado de gases de incineradores de residuos peligrosos o municipales (polvos generados en el precipitador electrostático), desechos de los procesos de pirolisis lodos con bario o mercurio, residuos con berilio, acumuladores (Ni-Cd), baterías (Hg), lámparas de mercurio, sales de Na, Ca, Ba, Mg, Cu, CN, Al, Va, plaguicidas, transformadores, catalizadores. (Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, 1998). En Reino Unido se confinan residuos alcalinos de la producción de carbonato de sodio, residuos orgánicos de la producción del percloroetileno y otros clorohidrocarburos, desechos municipales, lodos del drenaje y lodos con salmuera; en Canadá se confinan residuos de la industria petrolera y en los Países Bajos se dispone la salmuera con cloruro de magnesio, residuos de la purificación de la salmuera y residuos de los campos petroleros.

3.4.3 Usos poco comunes de las cavidades salinas

Se ha propuesto el almacenamiento de granos de alimentos con sistemas de transporte neumáticos dentro de las cavidades salinas (Bishop, 1991). Es atrayente el almacenamiento de gas natural líquido en cavernas salinas, debido a que los requerimientos de volumen se reducen por un factor de aproximadamente 600 de la fase gaseosa (Halbouty, 1979). Sin embargo, se requieren temperaturas criogénicas, las cuales causaron fracturas extensas en la sal durante una prueba de almacenamiento de gas natural líquido en una mina alemana (Haddenhorst et al., 1977). Los requerimientos del volumen de almacenamiento de gas también se pueden reducir por un factor de aproximadamente 2, usando el gas enfriado (Schalge y Swartz, 1998). Algunos tipos de material poco común almacenado en las cavernas de sal incluyen al hidrógeno, al anhídrido de amoníaco (Thiel, 1993) y al helio (Rezunenکو y Smirnov, 1994; Rezunenکو et al., 1999).

En Norteamérica se han empleado formaciones salinas para realizar pruebas de dispositivos nucleares (Eargle y Herbst, 1970). Dos dispositivos de 5 kilotones se detonaron en la sal como parte de los programas "Plowshare" y el proyecto "Dribble", respectivamente. El acontecimiento "Gnome" del programa Plowshare ocurrieron en una cama de sal cerca de Carlsbad, Nuevo México, en Estados Unidos de Norteamérica, en el año 1961, y el acontecimiento "Salmón" del proyecto Dribble ocurrió en el domo Tatum cerca de Hattiesburg, Mississippi, en Estados Unidos de Norteamérica, en el año 1964. Tres pruebas adicionales, que implican explosiones de gas natural, se realizaron en la cavidad formada en la reserva de sal Tatum, Salmon. Hasta el momento no se ha reportado ninguna fuga de radiactividad del domo salino Tatum, el cual puede citarse como un ejemplo de las propiedades de contención excepcionales de las cavidades salinas, debido a un confinamiento adecuado y a la cubierta salina (Thoms y Gehle, 2000).

Por otra parte, los domos salinos también se han empleado como sitios de atracción turística, tal es el caso de Colombia, en donde a 50 km de Bogotá D. C. se encuentra la Catedral de Sal de Zipaquirá, la cual es considerada una de las maravillas del mundo. Esta construcción se encuentra en el interior de un domo salino, contiguo a una mina de sal la cual aún se encuentra en operación. Los turistas pueden recorrer el interior del domo, a la vez que pueden apreciar parte de la actividad minera que se realiza en ese lugar.

3.5 ACCIDENTES RELACIONADOS CON EL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN CAVIDADES SALINAS

Dado que los hidrocarburos son un recurso muy valioso, debido a la cantidad de energía que liberan cuando se queman o explotan, su almacenaje se realiza considerando todas las medidas de seguridad posibles, de esta forma se ha optado por almacenarlos en instalaciones subterráneas, o en tanques de acero y concreto en la superficie de la tierra. Cabe destacar que las instalaciones de almacenaje subterráneas son mucho más seguras en términos de seguridad y protección al ambiente: las formaciones de sal son casi perfectamente impermeables; bajo la tierra, los hidrocarburos se separan del oxígeno presente en el aire (necesario para la combustión) por varios cientos de metros de roca, esta misma barrera natural los protege del fuego y del daño deliberado. Las altas presiones de almacenamiento no representan ningún problema dado que la alta presión es el estado natural de los fluidos subterráneos, además de que el almacenaje subterráneo es sumamente económico en términos del área de terreno requerida. A pesar de que el confinamiento subterráneo de hidrocarburos es seguro, han ocurrido algunos accidentes. Debe hacerse notar que la mayor parte de dichos accidentes pasaron en cavernas viejas, que fueron creadas cuando se tenía poca experiencia sobre el tema y cuando las regulaciones existentes eran menos rigurosas. Se ha aprendido mucho de los cientos de cavernas que se han operado durante décadas, conduciendo a mejoras considerables en la construcción y en la operación de cavernas subterráneas (Bérest y Brouard, 2003). Dentro de los accidentes más conocidos se encuentran los siguientes:

- ✦ *El accidente en la Instalación de West Hackberry (Louisiana, Estados Unidos de Norteamérica).* El domo salino de West Hackberry se localiza cerca del Golfo de México al sur del estado de Louisiana. En 1977, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica (DOE por sus siglas en inglés) adquirió un conjunto de cavidades que habían proporcionado salmuera para la industria química. Actualmente estas cavidades se usan como una parte del Programa Federal para la Reserva Estratégica de petróleo crudo (Furiga y Smith, 1983). La capacidad total del sitio es 50 000 bbl (8 Mm³) de petróleo. La descripción completa de este accidente se presenta en DOE (1980). El accidente ocurrió el 21 de septiembre de 1978, durante la operación de uno de los pozos en la cavidad número 6 (esta cavidad grande tiene varios pozos, permitiendo retiradas razonablemente rápidas). Aproximadamente 72 000 bbl de petróleo (10 000 m³) se esparcieron en el aire y se incendiaron, matando a un hombre del equipo de perforación. El informe antes mencionado contiene una descripción detallada de los pasos tomados para combatir la contaminación resultante. El informe del DOE estima el costo total del accidente entre 14 y 20 millones de dólares a precio del año de 1980. Este accidente muestra que los riesgos más altos no son resultado de la operación normal de la instalación, sino de las operaciones especiales de la misma (Bérest y Brouard, 2003).
- ✦ *Incendio de un almacenamiento de propano líquido.* El accidente sucedió en una terminal de almacenaje de propano de dos cavernas y, junto con el plan de sellado y destrucción, se describe en Gebhardt et al. (2001). La caverna en la cual ocurrió la explosión se extendió de 360 a 750 m. Se creía que las dos cavernas se comunicaban, debido al trabajo prematuro en otro almacén que condujo a la fractura de la sal. El nitrógeno empleado indujo el desarrollo de grandes presiones en las dos cavernas. Originalmente los pozos fueron perforados como productores de petróleo a finales de los años 1950s, cuatro décadas antes del accidente, y una fuga en la cubierta a una profundidad baja fue el resultado del desarrollo de dicha presión. El gas licuado escapó por el suelo hasta un área a 30 m del pozo. El gas se encendió y se quemó con un humo negro pesado. La extinción del fuego no era una opción viable, dado que era probable una nueva ignición (Bérest y Brouard, 2003). La operación de destrucción usó técnicas innovadoras descritas en Gebhardt et al. (2001).
- ✦ *Sobrellenado en Brenham (Texas, Estados Unidos de Norteamérica).* En el almacenaje de productos líquidos/licuados, la subestimación de la posición de la interfase salmuera/hidrocarburo en la caverna puede conducir a la entrada de hidrocarburo en la tubería llena de salmuera, con consecuencias dramáticas si el sistema de paro de emergencia en la fuente resulta defectuoso. Tal accidente ocurrió en Brenham, Texas, en 1992. El Consejo de Seguridad Nacional de Transporte (NTSB, 1993) reporta otros dos acontecimientos similares anteriores al aquí descrito en otros dos sitios, aunque estos no causaron daños serios. La caverna de almacenamiento en Brenham tenía una capacidad de

380 000 bbl (60 000 m³) llena de gas licuado de petróleo (en realidad, una mezcla de propano, etano, n-butano y otros gases). El 7 de abril de 1992 a las 5:43 a.m., se inyectó el gas licuado de petróleo (GLP) en la caverna. Se supone que el agujero de goteo proporcionaría la advertencia en caso de sobrellenado inminente. El GLP voló en la tubería, permitiendo un descenso en la densidad del fluido de la columna central, vaporización parcial, extensión de los gases ligeros, caída de presión en la caverna y, por último, un flujo de gas más grande por el agujero de goteo y la tubería base. La salmuera, seguida del gas licuado, estalló en la superficie del estanque de salmuera. Un cálculo posterior demostró que se expulsaron de 3 000 a 10 000 bbl (500 a 1 600 m³) de gas líquido. La liberación del gas en la atmósfera activó los detectores de gas a nivel de terreno. Tal activación era un acontecimiento relativamente frecuente en esta estación, a menudo sin relación a un escape real de gas. El distribuidor en Tulsa no fue capaz de interpretar correctamente la información algo confusa entregada por el sistema telemétrico. La válvula de paro (o válvula de seguridad de la caverna) fue pensada para reaccionar inmediatamente a altos niveles de presión (100 psi, o 0,7 MPa) en la tubería de salmuera en el cabezal del pozo, pero el sistema falló. Se desarrolló una nube de gas más pesada que el aire, probablemente a 10 m de altura por encima de la estación. Los empleados bloquearon las rutas para prevenir el acceso a la estación. A las 7:08 a.m., un coche entró en la nube brumosa e incendió el gas, causando una severa explosión (se registraron lecturas de 3,5 a 4 grados en la escala de Richter), y tres personas murieron a causa de las heridas que recibieron (Bérest y Brouard, 2003).

- ✦ *Incendio en la instalación de BP Canadá (Alberta, Canadá).* Para el almacenaje de gas natural, se deja un poco de salmuera en el fondo de la caverna, y el movimiento de salmuera no se toma en cuenta cuando se inyecta o se retira el gas. La presión del gas aumenta cuando se inyecta el gas y disminuye cuando se extrae el gas. En caso de que el cabezal del pozo falle, el volumen de gas de toda la caverna sería expulsado. Este fenómeno probablemente se extendería por varias semanas, dependiendo de la presión inicial de gas y de la pérdida de carga en el pozo. La erupción sería la más espectacular, pero probablemente menos peligrosa que una erupción de gas LP, porque el gas natural es considerablemente menos denso que el aire. La nube de gas se movería hacia arriba rápidamente y se dispersaría en la atmósfera. En algunos casos, la nube podría encenderse en una etapa temprana, pero si esto no ocurre, el riesgo de explosión sería pequeño. El 26 de agosto de 2001, ocurrió una liberación incontrolada de etano en la instalación de BP Canadá, operada en Fort-Saskatchewan, Alberta. La fuga de etano se desarrolló en un tubo horizontal que unía dos cabezales de pozo de la caverna 103, una cavidad de almacenaje de etano equipada con un pozo de producto y un pozo de salmuera. Los expertos de control de fuego rociaron agua para enfriar los dos cabezales de pozo. La presión de la caverna descendió conforme la cavidad se iba vaciando. El 1 de septiembre de 2001, el poco fuego restante sobre el pozo de la salmuera fue sofocado y se colocó una nueva válvula maestra. Tres días después, se colocó un tapón en el segundo pozo, y la emergencia fue declarada como terminada (*Op. Cit.*).
- ✦ *Fuga y explosión en Mont Belvieu (Texas, Estados Unidos de Norteamérica).* Este accidente ocurrió en el año de 1980, donde un domo salino era usado por un gran número de empresas y donde varias docenas de cavidades se habían formado por minería de disolución. Este sitio tiene la capacidad de almacenaje más grande para productos petroquímicos en todo Estados Unidos de Norteamérica. El 17 de septiembre de 1980 se registró un descenso en la presión en una de las cavidades que contenía gas licuado de petróleo. El 3 de octubre de ese mismo año, el gas (70% etano y 30% propano) que se había acumulado en la cimentación de una casa, cercana al área del domo salino, explotó como consecuencia de una chispa proveniente de un aparato eléctrico. La cavidad en la cual había descendido la presión se llenó de salmuera. En los días siguientes, el gas apareció al azar alrededor del área, y aproximadamente 50 familias tuvieron que ser evacuadas. Se perforaron varios orificios en el nivel freático encima de la sal para encontrar y ventear el gas (*Op. Cit.*).
- ✦ *El accidente de Hutchinson (Kansas, Estados Unidos de Norteamérica).* Debido a la diversidad de información existente acerca de este accidente, y evitando mal interpretar dicha información, se presenta únicamente una breve reseña del accidente ocurrido en Hutchinson, Kansas. El 17 de enero de 2001, una repentina liberación y explosión de gas natural bajo dos tiendas vecinas en el centro de Hutchinson, rompió docenas de vidrios. Después de unos minutos, los dos negocios estaban en

llamas. Por la tarde del mismo día, ocho (algunos informes dicen que fueron nueve) géiseres de salmuera y de gas natural comenzaron a burbujear, a 2 ó 3 millas al este del centro en llamas, algunos alcanzaban 10 m de alto, y dos géiseres se incendiaron. Se sospecha que los fluidos habían emigrado subterráneamente por los pozos de salmuera abandonados que se habían perforado en 1880 para almacenar propano (Allison, 2001; Wilson, 2002; Bérest y Brouard, 2003).

3.6 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO DE LA CAVIDAD

Durante el desarrollo y operación de la cavidad salina pueden generarse diversos estados de esfuerzo en la masa salífera, mismos que pueden ocasionar su falla. Para realizar dicha evaluación, es necesario contar con información relacionada con las propiedades físicas de la masa salífera y con la redistribución de esfuerzos en el área circundante de la abertura. La redistribución de esfuerzos se debe al desarrollo de la cavidad y a los cambios cíclicos en la presión interna de la caverna, la cual varía desde un valor máximo, al final del período de inyección, hasta un valor mínimo, que se presenta al final del ciclo de extracción. Los modos de falla potenciales que pueden desarrollarse alrededor de la abertura de la cavidad salina incluyen la inestabilidad estructural de la caverna, la pérdida de volumen de almacenamiento y las filtraciones. (Fernández, 2001)

La *inestabilidad estructural* se debe a la elevada concentración de esfuerzos en el área cercana a las paredes de la caverna, lo cual puede inducir a la ruptura y/o a la falla de una delgada capa salina alrededor de la caverna. Debe tenerse en cuenta que durante la etapa de producción se presentan concentraciones elevadas de esfuerzos en la masa salífera. Si el espesor de la zona fracturada es similar o excede el espesor de la cubierta impermeable del techo y/o del piso de la caverna, el producto almacenado puede conectarse hidráulicamente con los estratos permeables que se encuentran por arriba o debajo de los depósitos de sal. Durante la inyección del material o residuo a almacenar dentro de la caverna, pueden desarrollarse fugas de magnitud considerable debido a los esfuerzos hidráulicos desarrolladas a lo largo de la zona fracturada. La *pérdida de volumen de almacenamiento* se genera por la deformación plástica, también denominada deformación progresiva o creep (por su nombre en inglés), de las paredes de la caverna. Los efectos de la deformación progresiva sobre algunas cavernas salinas se pueden apreciar en la figura 3.9, nótese que las líneas punteadas representan los sedimentos insolubles en el fondo de la caverna.

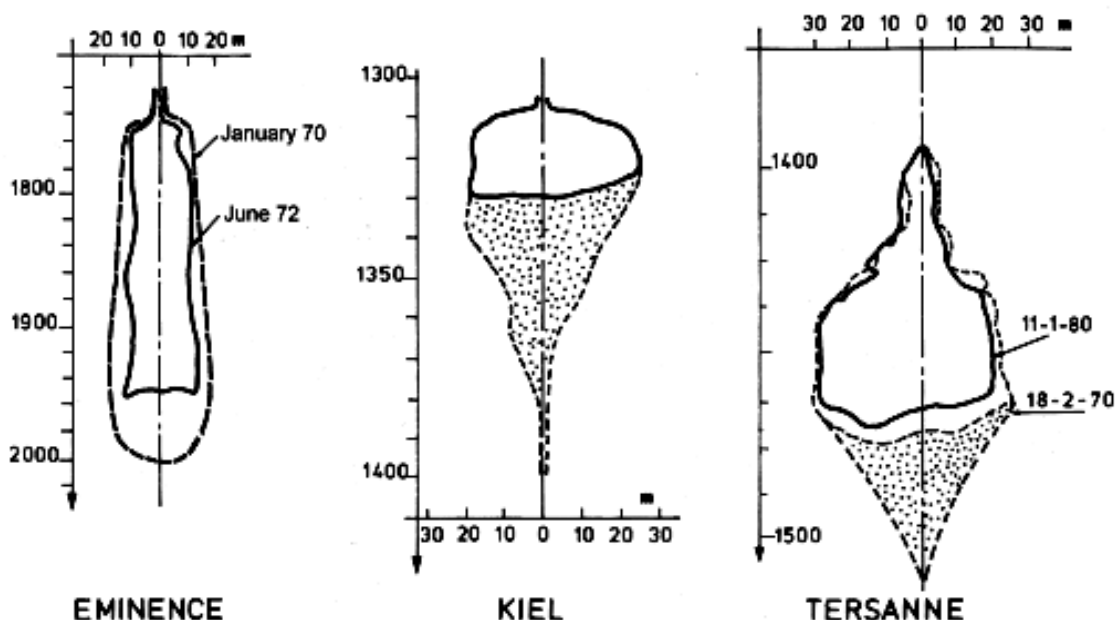


Figura 3.9 Efectos de la deformación progresiva en las cavernas de Eminence, Kiel y Tersanne.

Fuente: Bérest y Brouard, 2003.

La mayor parte de la deformación progresiva ocurre bajo periodos sostenidos de presión interna baja. Debido a las concentraciones de esfuerzo en las zonas adyacentes a las paredes de la caverna, los materiales salíferos que se encuentran alrededor de la abertura se deforman plásticamente, generando desplazamientos de las paredes hacia el interior de la caverna, ocasionando con ello una redistribución de los esfuerzos. Dicha redistribución de esfuerzos es temporal, y gradualmente se reduce la velocidad de la deformación progresiva de la masa salífera, disminuyendo así la pérdida de volumen de almacenamiento. Sin embargo, la transferencia de esfuerzos lejos de la cavidad involucra una masa salífera más grande alrededor de la caverna, la cual aún experimenta cierto grado de deformación plástica, a una menor velocidad y puede ocasionar una reducción importante del volumen de almacenamiento durante la vida de la caverna. Por otra parte, se pueden desarrollar *filtraciones* hacia el exterior de la caverna, si la presión del producto almacenado excede el esfuerzo mínimo *in situ* en la masa rocosa que se encuentra alrededor de la abertura. Si la presión desarrollada es lo suficientemente grande, se puede llegar a abrir las fracturas existentes de la masa rocosa que rodea a la abertura de la caverna salina (hidrocompresión) o puede inducir nuevas fracturas dentro de dicha masa rocosa (hidrofracturación). El material o residuo almacenado puede infiltrarse hacia los depósitos permeables que se encuentren por arriba o debajo del nivel de almacenamiento. Debe indicarse que también se pueden producir filtraciones en cavernas bajo presiones operativas bajas, si los estratos porosos que se encuentran arriba o abajo del yacimiento salino están saturados con salmueras naturales que estén sometidas a presiones hidrostáticas mayores a la presión existente en la cavidad salina (Veil et al., 1996; Fernández, 2001).

3.7 COSTOS DE DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

La considerable inversión de capital, combinada con el alto costo de funcionamiento y de las sustancias químicas empleadas, ha causado una búsqueda de métodos más baratos para la disposición final de los residuos peligrosos. Esta búsqueda se ha obstaculizado por la falta de información disponible sobre los costos necesarios para alcanzar un nivel aceptable de control de los residuos. Lo anterior se debe a una variedad de factores, entre los cuales están (Herbert, 1996):

- 1) La falta de un consenso acerca de qué constituye los niveles de control comparables a través de las alternativas tecnológicas.
- 2) Las incertidumbres de la normatividad que se va desarrollando.
- 3) La información de los costos que generalmente está especificada para el uso de una tecnología específica hacia un residuo en particular, y
- 4) La naturaleza dinámica de los costos conforme la industria adquiere experiencia para dar respuesta a las exigencias legales.

Los costos de los pozos de inyección profunda de residuos peligrosos siempre están bajo la influencia de los factores antes mencionados, haciendo difícil la valoración del costo exacto a largo plazo. De acuerdo con Herbert (1996), se han intentado estimar los costos de construcción y operación de pozos profundos con base en la experiencia con pozos petroleros y de gas, pozos de inyección de salmuera y con los datos limitados disponibles acerca de pozos de inyección de residuos industriales. De igual manera indica que “el costo de inversión de algunos sistemas de inyección de residuos puede exceder el costo de las instalaciones de tratamiento superficiales.” Así, el margen económico está dado por la amplia diferencia en los costos de funcionamiento de los dos sistemas, porque los sistemas de inyección de residuos requieren de supervisión menos intensa. Los costos de operación de los pozos de inyección han mostrado ahorros de 80 000 a 500 000 dólares por año sobre otros métodos de tratamiento. Los costos fijos para la construcción del pozo tales como perforación, pruebas y terminación, equipo de bombeo, y las instalaciones de tratamiento de los residuos previo a su inyección representan del 50% al 80% del costo total de una unidad de inyección. El costo fijo de un pozo de inyección puede variar enormemente con la necesidad de las instalaciones de tratamiento previo a su inyección, con la composición mineralógica y la profundidad de la zona de inyección.

3.7.1 Costos de disposición fuera del sitio de generación del residuo peligroso

La información que a continuación se presenta se extrajo de un documento generado por Veil (1997), para el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica, cuya finalidad es comparar los costos de disposición de residuos peligrosos en instalaciones profundas y superficiales en operación, en el estado de Texas, en Estados Unidos de Norteamérica. Debe indicarse que el autor aclara que no hay ninguna garantía que los costos reportados reflejen los costos reales que serían cargados a los clientes.

El costo de disposición fuera del sitio comercial varía, según el método de disposición empleado, el lugar en el cual se localiza la empresa de disposición, y el grado de competencia en el área. El informe antes mencionado contiene datos de costos para tres categorías de residuos:

1. Residuos sólidos y aceitosos (desechos de volumen pequeño, generados como resultado de las actividades de exploración y producción del petróleo y del gas, pero no son residuos de la perforación o agua de producción).
2. Agua producida⁸, agua de lluvia, y otros tipos de residuos de agua.
3. Residuos de perforación⁹ a base de agua.

De acuerdo con el informe presentado por Veil (1997), los costos de disposición para los residuos sólidos y aceitosos van de 0 a 57 us\$/bbl, de 6,50 a 50 us\$/yd³, y de 12 a 150 us\$/ton. Los costos de disposición del agua producida, del agua de lluvia, y otros tipos de residuos de agua se encuentran en el rango de 0,01 a 8 us\$/bbl, aunque la mayoría de los costos caen en el rango de 0,25 a 1,50 us\$/bbl. La disposición de los residuos de perforación a base de agua tiene un costo que va de los 0,20 a 14,70 us\$/bbl, de 5 a 37,50 us\$/yd³, y de 15 a 55 us\$/ton. Debe aclararse que la unidad de us\$/yd³ se emplea a menudo cuando los residuos son predominantemente sólidos, y la unidad de dólares/ton comúnmente se usa en los rellenos sanitarios porque los costos para la disposición de basura municipal sólida están basados en dólares/ton. En la tabla 3.2 se presenta el costo de disposición de los residuos peligrosos de la industria petrolera, anteriormente mencionados, para diferentes métodos de disposición y tratamiento.

Tabla 3.2 Costos de disposición de residuos petroleros.

Método	us\$/bbl	us\$/yd ³	us\$/ton
Dispersión sobre tierra	5,50 – 57	14 – 40	20 – 95
Relleno sanitario	0,50 – 36	6,50 – 37,50	17 – 150
Evaporación	2,50 – 2,75	4,20 – 18,90	
Tratamiento/reuso	0 – 12	12,50 – 28,50	12 – 45
Incineración	10,50 – 38		20 – 100
Inyección	8,50 – 11		
Cavernas salinas	1,95 – 6	50	

Fuente: Veil, 1997.

Específicamente, para el caso de México, los especialistas del Colegio de Ingenieros Geólogos de México indican que ya se han planteado alternativas económicas para confinar residuos peligrosos en México como los domos salinos, y que pueden garantizar un confinamiento seguro durante 10 mil años sin causar impactos ambientales relevantes al entorno o la población. “A esto se suma un costo tres veces inferior a lo que hoy se invierte para trasladar y ubicar en Mina, Nuevo León, una tonelada de desechos con un precio aproximado de 150 dólares, mientras que los domos salinos podrían funcionar con una inversión de 50 dólares por tonelada” (Periódico La Jornada, 2005).

⁸ El agua producida es el agua que se trae a la superficie con el aceite y el gas. Esto ocurre naturalmente en las formaciones donde se encuentra el aceite y el gas, y generalmente es salobre.

⁹ Los residuos de perforación incluyen lodos de perforación, recortes de perforación, agua de lavado, y otros residuos relacionados.

CAPITULO IV. DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO PELIGROSO A CONFINAR

En este estudio se plantea la necesidad de confinar residuos peligrosos contaminados con hidrocarburos, dentro de domos salinos en México, por lo que de acuerdo con lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-145-SEMARNAT-2003, sólo se pueden confinar en cavidades estabilizadas con salmuera (vía húmeda¹⁰) los residuos contaminados con hidrocarburos que sean compatibles entre sí. Para lo cual se debe cumplir lo siguiente:

1. Los residuos contaminados con hidrocarburos que sean compatibles entre sí deberán ser acondicionados antes de ser confinados en la cavidad.
2. Los residuos contaminados con hidrocarburos que sean compatibles entre sí no deberán mezclarse con otros residuos peligrosos dentro de la cavidad.

Debe indicarse que la compatibilidad de los residuos se debe determinar conforme a los procedimientos establecidos en la NOM-054-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Debido a que los residuos a confinar dentro del domo salino están contaminados con hidrocarburos, se deben estabilizar y acondicionar antes de disponerlos, por lo cual resulta necesario describir las características del petróleo. Es importante aclarar que en la industria petrolera, la palabra hidrocarburos abarca a estos compuestos en sus cuatro estados: gaseoso, líquido, semisólido y sólido.

4.1 GEOLOGÍA Y COMPOSICIÓN DEL PETRÓLEO

Las cinco fases para la formación y origen de un yacimiento petrolífero son las siguientes:

1. Formación de hidrocarburos.
2. Migración primaria.
3. Migración secundaria.
4. Entrampamiento.
5. Conservación del yacimiento.

En nuestro país se le ha dado preferencia al estudio de las trampas geológicas y relativamente poca importancia a los procesos de origen y migración, aunque el actual Golfo de México debería considerarse como un laboratorio natural donde serían de gran interés estos estudios. El origen del petróleo es un tema apasionante que todavía está sujeto a controversias de carácter científico. Se han ofrecido muchas teorías tanto por geólogos como por geoquímicos muy eminentes, que parecen dar explicaciones más o menos posibles sobre el origen y el modo de formación de algunos depósitos petrolíferos, pero hasta la fecha no se ha logrado dar una explicación completamente satisfactoria. Casi todas las teorías que tratan sobre el particular pueden clasificarse en dos grupos: (López R., 1983)

- a) Teorías inorgánicas.
- b) Teorías orgánicas.

¹⁰ Operación de la cavidad saturada con salmuera.

Las teorías inorgánicas pretenden explicar la formación del petróleo como el resultado de reacciones geoquímicas entre el agua y el bióxido de carbono, además de varias sustancias inorgánicas como carburos y carbonatos de metales. Las teorías orgánicas suponen que el petróleo es producto de la descomposición de organismos vegetales y animales que existieron en ciertos períodos del tiempo geológico.

A continuación se presentan las principales teorías inorgánicas y orgánicas del origen del petróleo:

Teorías inorgánicas.

- 1) De los carburos inorgánicos de Berthelot.
- 2) Del Carburo de Mendeleev.
- 3) Volcánica de Moissan.
- 4) Cósmica de Sokolow.

Teorías orgánicas.

- 1) Origen animal de Engler.
- 2) Origen vegetal de Hoffer.
- 3) Por procesos de laboratorio.

Los principales factores que han contribuido al desuso de las primeras puede decirse que han sido las siguientes: (*Op. Cit.*)

- a) La ausencia muy notable de petróleo en las rocas que se formaron durante las épocas de mayor actividad volcánica.
- b) La imposibilidad, hasta el presente, de producir petróleo sintético a partir exclusivamente de materiales inorgánicos. Por otro lado, hay evidencia suficiente que corrobora el hecho de que el petróleo puede derivarse tanto en la naturaleza como en el laboratorio, de materiales orgánicos de origen vegetal o animal, habiendo aumentado recientemente el porcentaje de posibilidades de origen orgánico-vegetal.

Cabe recordar que el petróleo no se encuentra distribuido de manera uniforme en el subsuelo hay que tener presencia de al menos cuatro condiciones básicas para que éste se acumule;

- ◆ Debe existir una roca permeable de forma tal que bajo presión el petróleo pueda moverse a través de los poros microscópicos de la roca.
- ◆ La presencia de una roca impermeable, que evite la fuga del aceite y gas hacia la superficie.
- ◆ El yacimiento debe comportarse como una trampa, ya que las rocas impermeables deben encontrarse dispuestas de tal forma que no existan movimientos laterales de fuga de hidrocarburos.
- ◆ Debe existir material orgánico suficiente y necesario para convertirse en petróleo por el efecto de la presión y temperatura que predomine en el yacimiento.

El petróleo es una mezcla de diferentes productos hidrocarburos. Para poder utilizarlo en las diferentes ramas de la industria y en los motores de combustión interna debe sufrir una serie de tratamientos diversos. Muy a menudo la calidad de un crudo depende en gran medida de su origen. En función de dicho origen sus características (color, viscosidad, contenido de azufre, punto de fluidez y contenido de diversos metales) varían, por lo cual el petróleo crudo a pie de pozo no puede utilizarse tal cual. Se hace por tanto indispensable el empleo de diferentes procesos de tratamiento y transformación para la obtención del mayor número de productos de alto valor comercial. El conjunto de estos tratamientos constituyen el proceso de refinación del petróleo.

El petróleo crudo puede contener benceno, tolueno, xileno, etilbenceno, hidrocarburos aromáticos polinucleares, n-hexano y sulfuro de hidrógeno en proporciones variables, las cuales dependen del origen del crudo. Al analizar petróleo de procedencias diversas, de manera general puede decirse que lo forman los siguientes elementos químicos: de 83% a 87% carbono y de 11% a 14% de hidrógeno (Secretaría de Energía, 2005). También se puede considerar que contiene entre 0 y 2,5% de azufre y entre 0 y 0,2% de nitrógeno. Asimismo, tiene pequeñas cantidades, del orden de partes por millón, de compuestos con átomos de nitrógeno o de metales como hierro, níquel, cromo, vanadio y cobalto.

El petróleo crudo tiene cantidades apreciables de sales como cloruro de sodio, calcio, magnesio, entre otros, debido a su formación en aguas marinas o salobres. Esto es un problema, porque los cloruros van a provocar corrosión, sobre todo los de magnesio. Contiene abundantes impurezas de compuestos orgánicos en los que intervienen componentes como el azufre, oxígeno, nitrógeno, mercaptanos, SO₂, H₂S, alcoholes mezclados también con agua salada, ya sea libre o emulsionada, en cantidad variable, también se encuentran diversas sales minerales como cloruros y sulfatos de Ca, Mg y Fe. Es importante destacar el hecho de que el petróleo mexicano es rico en azufre, metales y asfaltenos. (López R., 1983)

4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO CRUDO

Característica	Descripción / Valor
Número CAS ¹¹ :	8002-05-9
Número de la ONU:	1267
Clase o división de riesgo:	III
Estado físico:	Líquido
pH:	No disponible
Color:	<p>El petróleo es un líquido viscoso cuyo color depende del contenido y estructura de las sustancias resinosas, de esta forma su color varía entre el amarillo y el pardo oscuro hasta el negro. Al parecer el color del petróleo crudo depende de la presencia de hidrocarburos no saturados y de los que contienen nitrógeno, oxígeno, azufre, además de hidrógeno y carbono.</p> <p>Por transmisión de la luz, los crudos pueden tener color amarillo pálido, tonos de rojo y marrón hasta llegar al negro.</p> <p>Por reflexión de la luz pueden parecer verdes, amarillos con tonos azules, rojo, marrón y negro.</p> <p>Los crudos pesados y extrapesados son, casi en su totalidad, de color negro. Los crudos con un alto contenido de cera son livianos y de color amarillo; al bajar bastante la temperatura tienden a solidificarse notablemente y cuando aumenta la temperatura, presenta cierto hervor en el tanque. El crudo más liviano o condensado llega a tener un color blanquecino, lechoso y a veces se usa en el campo como gasolina cruda.</p>
Olor:	<p>El olor de los crudos es aromático como el de la gasolina, el queroseno u otros derivados. Si el crudo contiene azufre tiene un olor fuerte y hasta repugnante. Si contiene sulfuro de hidrógeno, los vapores son irritantes, tóxicos y hasta mortíferos.</p> <p>Para indicar la calidad de los crudos es común que la industria los designe como dulces o agrios.</p> <p>El sulfuro de hidrógeno (H₂S) tiene un olor a huevo podrido. Este olor no deber ser usado como una característica de advertencia de niveles tóxicos porque el H₂S puede abrumar y amortiguar el sentido de olor. También, el olor del H₂S en petróleos pesados fácilmente puede ser enmascarado por el olor parecido al del aceite. Por lo tanto, el olor de H₂S no debe usarse como indicador de una condición peligrosa.</p>
Sabor:	<p>El sabor del petróleo crudo es una propiedad que se torna importante cuando el contenido de sal es bastante alto. Esta circunstancia requiere que el crudo reciba un tratamiento adecuado en las instalaciones de producción para ajustar la concentración en g/m³ de sal al mínimo aceptable por los compradores y las refinerías.</p>
Aspecto:	Líquido viscoso de color pálido a negro
Solubilidad:	Insoluble en agua.

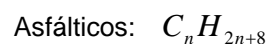
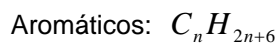
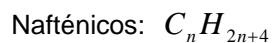
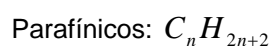
¹¹ Siglas en inglés del Chemical Abstract Service.

Característica	Descripción / Valor
Índice de refracción:	Se define como la relación de la velocidad de la luz al pasar de un cuerpo a otro. Medido con un refractómetro, los hidrocarburos presentan valores entre 1,39 y 1,49.
Densidad:	Los crudos pueden pesar menos que el agua (crudos liviano y mediano) o más que el agua (crudos pesados y extrapesados). De aquí que su densidad varía de 0,75 a 1,10 g/ml. Se puede tomar como valor de referencia una densidad de 910 kg/m ³ (0,91 g/cm ³) a 15 °C. Cabe destacar que la densidad, la gravedad específica o los grados API ¹² denotan la relación correspondiente de peso específico y de fluidez de los crudos con respecto al agua.
Viscosidad:	Es una de las características más importantes de los hidrocarburos en los aspectos de producción, transporte, refinación y petroquímica. La viscosidad indica la resistencia que presenta el crudo al flujo interno. El poise o centipoise (0,01 poise) se define como la fuerza, en dinas, requerida para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área y separado un centímetro de distancia entre sí y separados por el líquido investigado, para obtener un desplazamiento de un centímetro en un segundo. La viscosidad de los crudos en el yacimiento puede ser desde los 0,2 centipoise hasta más de 1,0 centipoise. Debe indicarse que es muy importante el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los crudos, en el yacimiento o en la superficie, especialmente para los crudos pesados y extrapesados. La viscosidad relativa: es la relación de la viscosidad del fluido respecto a la del agua. A 20 °C la viscosidad del agua pura es de 1,002 centipoise. La viscosidad cinemática es equivalente a la viscosidad expresada en centipoises dividida por la gravedad específica, a la misma temperatura. Se designa en stokes o centistokes. Dinámica: 0,108 Pa·s (108 cP) a 20°C Cinemática: 34 mm ² /s (34 cSt) a 40°C
Punto de ebullición:	No es constante. Debido a sus constituyentes varía poco menos que la temperatura de la atmósfera hasta una temperatura mayor o igual que 300 °C. A una presión de 760 mmHg su punto de ebullición va de -6,67 °C (20 °F) a 204,44 °C (400 °F)
Punto de congelación:	Depende de las propiedades y características de cada crudo o derivado. Varía y puede llegar hasta los -73 °C. Este factor es importante al considerar el transporte de los hidrocarburos y las estaciones del año, principalmente el invierno.
Punto de inflamación:	< 15 °C (copa cerrada) Pensky-Martens.
Temperatura de ignición:	Varía desde 2 °C hasta 310 °C.
Calor específico:	Es la relación de cantidad de calor requerida para elevar su temperatura un grado respecto a la requerida para elevar un grado la temperatura de igual volumen o masa de agua. El calor específico varía entre 0,40 y 0,52. El calor específico promedio para la mayoría de los crudos es de 0,45.
Poder calorífico:	Varía entre 35 y 47 kJ/kg, o bien, entre 15,35 y 22 BTU/libra.
Calor latente de vaporización:	Para la mayoría de los hidrocarburos parafínicos y metileno presenta valores entre 293 y 377 kJ/kg, ó bien, de 130 a 160 BTU/libra.
Límites de explosión:	Inferior: 0,6% Superior: 0,8%

¹² Siglas en inglés del Instituto Americano del Petróleo.

Característica	Descripción / Valor
% Volátil por volumen:	20 - 100
Presión de vapor @ 70 °F:	0 - 12 psia
Densidad de vapor (Aire = 1):	1,5 - 3,0
Tasa de evaporación (Etil éter = 1):	0,1 - 1,0
Coefficiente de participación n-octanol / agua:	2 - 6

Los petróleos se clasifican de acuerdo con las series de hidrocarburos predominantes que los constituyen, en series que agrupan los hidrocarburos cuyas propiedades son semejantes y se representan por las siguientes fórmulas condensadas:



La industria mundial de hidrocarburos líquidos clasifica el petróleo de acuerdo a su densidad API (parámetro internacional del Instituto Americano del Petróleo, que diferencia las calidades del crudo), para el caso de México se tiene lo siguiente (IMP, 2006):

Aceite crudo	Densidad (g/cm ³)	Densidad (grados API)
Extrapesado	> 1,0	10,0
Pesado	1,0 - 0,92	10,0 - 22,3
Mediano	0,92 - 0,87	22,3 - 31,1
Ligero	0,87 - 0,83	31,1 - 39
Superligero	< 0,83	> 39

Para exportación, en México se preparan tres variedades de petróleo crudo (*Op. Cit.*):

Nombre	Aceite crudo	Densidad (grados API)	% de azufre en peso
Itsmo	Ligero	33,6	1,3
Maya	Pesado	22	3,3
Olmecca	Superligero	39,3	0,8

4.3 CARACTERÍSTICAS DE ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Las características de estabilidad y reactividad del petróleo crudo son:

Característica.	Descripción / Valor
Estabilidad:	Estable en las condiciones normales de empleo.
Clasificación NFPA Salud: Fuego: Reactividad:	1 – 3 (escaso - alto) 2 – 4 (moderado - extremo) 0 (mínima)
Riesgo de polimerización:	No ocurrirá.
Condiciones a evitar/incompatibilidades:	Agentes oxidantes fuertes (tales como nitratos, peróxidos y cloratos), calor, chispas, flamas y chispas de electricidad estática.
Condiciones a evitar:	Evitar todas las fuentes posibles de ignición (chispa o llama).
Incompatibilidad:	Con varias sustancias reactivas con agentes que se oxidan.
Productos peligrosos de la descomposición:	CO, CO ₂ , SO ₂ , e hidrocarburos. Los productos de la descomposición termales son sumamente dependientes de las condiciones de combustión. Una mezcla compleja de sólidos, líquidos, partículas y gases se desarrollará cuando este material sufre pirolisis o combustión. El monóxido de carbono y otros compuestos no identificados orgánicos pueden ser formados sobre la combustión. Óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y óxidos metálicos.

4.4 CARACTERÍSTICAS DE TOXICIDAD

A continuación se presenta la toxicidad del petróleo crudo sobre el hombre y su ambiente.

Característica.	Descripción.
Contacto con los ojos:	Basado en la presencia de hidrocarburos ligeros, se asume que el petróleo crudo puede irritar suavemente los ojos.
Irritación de la piel:	Moderadamente irritante; provoca enrojecimiento, resequedad de piel. El petróleo crudo y algunas de sus fracciones han mostrado causar irritación de la piel cuando es aplicado directa y repetidamente a la piel. Si esta caliente puede causar quemaduras. El contacto prolongado y repetido puede causar varios trastornos de la piel como dermatitis, acné de aceite o tumores de la piel. El contacto con material comprimido puede causar quemaduras congelantes.
Absorción por la piel:	El uso a largo plazo y la aplicación repetida de crudo a la piel de ratones de laboratorio (sin lavarlos entre aplicaciones) causó un aumento estadísticamente significativo de la incidencia de tumores en la piel. El petróleo crudo contiene benceno, que puede causar degeneración en la sangre que forman los órganos provocando anemia que posteriormente puede degradarse a leucemia. Puede contener hidrocarburos policíclicos aromáticos que, en condiciones pobres de higiene personal y el contacto prolongado y repetido, se ha sospechado como una causa de cáncer de piel en la gente.

Característica.	Descripción.
Ingestión:	<p>Sumamente irritante a la garganta y al estómago. Provoca pérdida de conocimiento, convulsiones, cianosis, congestión y hemorragia de tubo capilar de los órganos pulmonares e internos. No es una ruta probable de entrada, pero puede causar quemadura de boca, náusea y vómito. La principal amenaza a la salud por ingestión ocurre del peligro de aspiración del líquido por los pulmones, particularmente de vómitos. La aspiración puede causar pulmonía química (fluido en los pulmones), daño severo pulmonar, falla respiratoria e incluso la muerte. La ingestión puede causar perturbaciones gastrointestinales, incluyendo irritación y diarrea, y actúa sobre el sistema nervioso central (el cerebro) de manera similar a la intoxicación por alcohol. En casos severos pueden ocurrir temblores, convulsiones, pérdida de conocimiento, coma, paro respiratorio y muerte.</p>
Inhalación:	<p>Causará narcosis y/o neumonitis química. La exposición excesiva puede causar irritaciones de nariz, garganta, pulmones y vías respiratorias. Los efectos sobre el sistema nervioso central (cerebro) pueden incluir dolor de cabeza, vértigo, pérdida de equilibrio y coordinación, inconsciencia, coma, paro respiratorio y la muerte. <i>Advertencia:</i> una exposición continua al sulfuro de hidrógeno mayor de 15 - 20 ppm puede causar irritación a la membrana mucosa y a las vías respiratorias; 50 - 500 ppm pueden causar dolor de cabeza, náusea, y vértigo, pérdida de razonamiento y equilibrio, dificultad en la respiración, fluido en los pulmones, y posible pérdida de conocimiento. Más de 500 ppm pueden causar inconsciencia rápida o inmediata debido a la parálisis respiratoria y la muerte por la asfixia a no ser que la víctima sea quitada de la exposición y se le resucite satisfactoriamente. <i>Precaución:</i> el sulfuro de hidrógeno (H₂S), el gas natural y otros vapores peligrosos pueden desarrollarse y reunirse en la parte superior de tanques de almacenaje u otros navíos. El H₂S gaseoso es más pesado que el aire y se reunirá en sitios bajos, es un gas sumamente inflamable y tóxico. Una exposición mayor de 300 ppm de H₂S es inmediatamente peligrosa a la vida y a la salud. La inhalación de otros hidrocarburos ligeros puede causar irritación pulmonar, náusea, vomito y puede causar depresión del sistema nervioso central. La OSHA ha concluido que el benceno puede causar leucemia en la gente y ha establecido un límite de exposición corto de 5 ppm en 15 minutos.</p>
Información ecológica:	<p><i>Persistencia / degradabilidad:</i> Intrínsecamente biodegradable. <i>Movilidad:</i> los derrames pueden penetrar el suelo causando la contaminación de aguas subterráneas. Este material puede acumularse en sedimentos. <i>Potencial bioacumulativo:</i> No se espera que este producto se bioacumule en las cadenas de alimenticias en el ambiente. <i>Peligros ambientales:</i> Daños a organismos acuáticos, pueden causar efectos a largo plazo adversos en el ambiente acuático. <i>Demanda biológica de oxígeno:</i> Aproximadamente 8% a los 5 días. <i>Otra información ambiental:</i> Los derrames pueden formar una película sobre la superficie de agua provocando daños físicos a los organismos. La transferencia de oxígeno también podría ser perjudicada. Si el producto se derrama en el agua puede formar emulsiones. El agua en las emulsiones de aceite puede ser sumamente viscosa y difícil de dispersarse.</p>

Característica.	Descripción.
Información toxicológica adicional:	Puede agravar la preexistencia dermatitis. Puede causar desórdenes en la formación de sangre, o conducir a la disfunción de hígado o riñón. Algunas sustancias químicas conocidas en el estado de California, Estados Unidos de Norteamérica, que causan cáncer, defectos de nacimiento u otro daño reproductivo, se pueden encontrar en el petróleo crudo y otros productos de petróleo. Aunque es posible refinar suficientemente un petróleo crudo o sus productos finales para quitar el potencial para el cáncer, es posible que una o varias de las sustancias químicas catalogadas puedan estar presentes en algunas cantidades perceptibles.

4.5 ORIGEN DE LOS ELEMENTOS EXTRAÑOS EN LA COMPOSICIÓN DE LOS HIDROCARBUROS

4.5.1 Azufre

El azufre se da en mayor o menor medida (entre un 0,1 y un 5,5% del peso) en casi todos los petróleos crudos y en cada una de las fracciones que los forman. Puede tener cualquiera de las siguientes formas o varias de ellas:

- 1) Azufre libre.
- 2) Sulfuro de hidrógeno.
- 3) Compuestos de azufre orgánicos, como aldehídos sulfúricos o mercaptanos, que contienen el grupo SH (como el propil aldehído sulfúrico o propilmercaptan) y los bisulfuros que contienen S₂ (como el 2, 3 hiposulfurbutano, C₄H₆S₂).

El petróleo de baja densidad, o alto peso específico, suele contener por lo general más azufre que otros. El contenido de azufre varía mucho: en un extremo encontramos los petróleos crudos de Pensilvania y Ébano Panuco de alta densidad, que tienen entre un 0,07 y un 0,08% de azufre y, en el otro extremo hay algunos petróleos crudos de México, muy pesados que tienen entre un 3 y un 5% de azufre. Muchas chapopoterías y lutitas bituminosas contienen un elevado porcentaje de azufre. El petróleo pesado de México, conocido como chapopoterías, tienen entre 6,15% y 10,75% de azufre. Los petróleos crudos que contienen menos de 0,5% de azufre son "crudos de poco azufre", en tanto los que tienen más de un 0,5% de azufre son "crudos de azufre alto". El contenido sulfuros de los petróleos crudos puede variar mucho, incluso dentro de una misma región productora. (López R., 1983)

4.5.2 Nitrógeno

Casi todos los petróleos crudos contienen pequeñas cantidades de nitrógeno. Nada se sabe acerca de la naturaleza de los compuestos del nitrógeno en el petróleo crudo no destilado, pero los compuestos del nitrógeno de los destilados son, por lo general, del tipo conocido como piridinas (C₅H₅N) y quinolinas (C₉H₇N). Como el nitrógeno es un constituyente inerte común del gas natural, es posible que el contenido de nitrógeno del petróleo crudo esté contenido en el gas disuelto en él. (*Op. Cit.*)

El nitrógeno es un componente indeseable en el petróleo crudo y en el gas natural y un componente esencial de los aminoácidos (CH₂(NH₂) COOH), es decir de las proteínas hidrolizadas de toda materia orgánica; el olfato lo recuerda cada vez que se percibe el amoníaco (NH₃), despedido por los desechos putrefactos. Tanto el carbono como el nitrógeno presentes pueden usarse para proporcionar una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica presente en un sedimento; el promedio de materia orgánica contenida en los sedimentos antiguos es 1,1 veces más abundante que el nitrógeno. El nitrógeno se encuentra en casi todos los petróleos principalmente como integrante de compuestos hidrocarburos complejos. (*Op. Cit.*)

4.5.3 Oxígeno

El oxígeno está contenido en el petróleo crudo en varias formas; por lo general representa menos de un 2% del peso y varía entre un 0,1% y un máximo de 4%, y puede presentarse en las siguientes formas: (López R., 1983.)

- 1) Oxígeno libre.
- 2) Fenoles (C_6H_5OH)
- 3) Ácidos grasos y sus derivados ($C_6H_5O_6(R)'$). Cualquier grupo radical alquilo.
- 4) Ácidos nafténicos que responden a la fórmula general C_nH_{2n-1} (COOH). Los ácidos orgánicos (nafténicos) agregan el grupo carboxilo a los hidrocarburos.
- 5) Sustancias asfálticas y resinosas. Se cree que estas sustancias se forman en parte por oxidación y polimerización de ciertos hidrocarburos del crudo.

4.5.4 Sustancias misceláneas

Por lo general el petróleo crudo contiene pequeñísimas cantidades de una amplia variedad de sustancias misceláneas, algunas orgánicas y otras inorgánicas. El material de origen orgánico observado bajo el microscopio, revela que incluye materias resistentes a la descomposición como esqueletos silíceos, fragmentos de madera petrificada, esporas, espinas, cutículas, resinas, fragmentos de carbón y lignito, algas, organismos unicelulares, piel, escamas de insectos y diminutas púas. (*Op. Cit.*)

Los elementos que se han identificado en la ceniza del petróleo crudo incluyen silicio, hierro, aluminio, calcio, magnesio, cobre, plomo, estaño, arsénico, antimonio, zinc, plata, níquel, cromo, molibdeno y vanadio. La mayor parte de estos elementos se encuentran en el agua de mar y posiblemente se derivaron de ella, como compuestos en suspensión coloidal o como materiales segregados por algas y otros organismos marinos, los cuales posiblemente proporcionaron el material del que se formó el petróleo. Se sabe que el vanadio y níquel se concentran en las porfirinas y reemplazan al magnesio de las clorofilas, con el resultado de que el contenido de vanadio y níquel en el petróleo crudo es a menudo varios miles de veces superior a su concentración en la corteza terrestre. El vanadio y el níquel se utilizan para correlacionar los petróleos crudos. Los minerales arcillosos ocasionalmente suben junto con el petróleo crudo; algunas ocasiones suelen asentarse junto con el agua que acompaña al petróleo, lo cual indica que probablemente estén asociados al agua antes que al petróleo. (*Op. Cit.*)

La mayor parte de los petróleos crudos contienen cloruro de sodio (NaCl); cuando la cantidad excede los 6,5 a 11,5 kg por 1 000 bbl es preciso desalar. Un exceso de sal (más de 0,7 ó 0,8%) actúa como un exceso de azufre: corroe el equipo. Parte de esta sal se dá en forma de cristales en el petróleo y parte se disuelve en el agua del yacimiento que, por lo general, sube a la superficie junto con el petróleo, en parte como emulsión. (*Op. Cit.*)

4.5.5 Anhídrido carbónico

El CO_2 es un gas incoloro, inodoro, no inflamable, una vez y media más pesado que el aire. Se disuelve con facilidad en el agua y un volumen de agua es capaz de disolver un volumen de gas a la presión y la temperatura normales en la superficie. En temperaturas y presiones atmosféricas es inerte; en concentraciones que superan el 8% resulta tóxico y produce desmayos por asfixia. (*Op. Cit.*)

El anhídrido carbónico es generado naturalmente por la acción de los ácidos en los carbonatos y bicarbonatos de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas; por oxidación de los hidrocarburos en contacto con aguas mineralizadas; por el calentamiento de carbonatos y bicarbonatos y por la acción de ciertas bacterias anaeróbicas que atacan los hidrocarburos. (*Op. Cit.*)

4.5.6 Sulfuro de hidrogeno o acido sulfhídrico

Aunque el sulfuro de hidrógeno (H_2S) se da en emanaciones volcánicas y en los gases de ciertos manaderos minerales, y se produce por descomposición de materia vegetal y animal, se cree que el sulfuro de hidrógeno encontrado en el gas natural y en el petróleo se ha formado por la reducción de los sulfatos en sulfuros por medios orgánicos e inorgánicos. (López R., 1983)

CAPITULO V. EVALUACIÓN DE LOS SITIOS PARA LA DISPOSICIÓN DEL RESIDUO PELIGROSO SELECCIONADO

5.1 GENERALIDADES SOBRE EL PROCESO DE SELECCIÓN

El proceso de selección de sitio para la disposición de residuos peligrosos estables es muy complejo debido a:

- Los requerimientos gubernamentales estrictos en todos los niveles (federal, estatal y local).
- La naturaleza multidisciplinaria de los procesos involucra una fuerte coordinación entre varios expertos, tales como geólogos, ingenieros geotecnistas, ingenieros químicos, ingenieros geofísicos, ingenieros ambientales, toxicólogos, biólogos, ingenieros civiles, etcétera.
- La naturaleza única de cada sitio y de cada residuo peligroso requiere que cada aspecto sea cuidadosamente analizado y evaluado.

A demás de las consideraciones técnicas, existen algunos factores que se deben tomar en cuenta, entre los que se incluyen:

- La proximidad a los generadores de residuos.
- La distribución de los centros de población.
- Los requerimientos constructivos.
- El potencial de aprobación por parte de las autoridades.

La selección del sitio para la disposición del residuo peligroso es una parte muy importante del presente trabajo, debido a la compleja serie de actividades y decisiones que hay que tomar, ya que además de cumplir con la normatividad nacional vigente se debe considerar el hecho de que los operadores tienen muy poco, casi escaso, control de los fenómenos naturales (precipitaciones, sismos, inundaciones, etc.) y de las diversas influencias sociales (procesos de migración de la población, desarrollos industriales y/o urbanos, etc.).

Con la finalidad de cumplir con los requerimientos establecidos por la normatividad mexicana en materia de protección al ambiente, se tomará como base los requerimientos establecidos por la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, su Reglamento en materia de residuos peligrosos, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y su proyecto de Reglamento, la norma oficial mexicana NOM-145-SEMARNAT-2003, relativa al confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables, la NOM-052-ECOL-2005, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, la NOM-054-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma NOM-052-ECOL-2005, y las demás disposiciones legales aplicables.

Se sabe que México cuenta con formaciones salinas importantes, una de las cuales se encuentra ubicada en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, y dos más, en los estados de Tamaulipas y Chihuahua. En México existen diferentes cuencas salinas, la más extensa y mejor estudiada es la del Istmo de Tehuantepec - Tabasco y parte de Chiapas, la cual se extiende hasta el norte de la actual costa del Golfo de México. También se ha encontrado sal en la porción oeste de la cuenca de Veracruz, así

como en el Golfo de Sabinas y en la región de Cuchillo Parado, al noreste de Chihuahua. Es muy probable que la formación de Veracruz sea la primera en ser desarrollada para los sitios de confinamiento de residuos peligrosos permitidos por la normatividad mexicana, ya que se encuentra cerca de la costa del Golfo de México y de las principales zonas de extracción de petróleo en México.

A continuación se describen brevemente los parámetros a considerar para la selección del sitio de confinamiento del residuo peligroso contaminado con petróleo, posteriormente se analiza cada uno de los parámetros mencionados para el caso del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, el cual, como anteriormente se había comentado, se presume pueda llegar a proporcionar sitios aptos para la disposición del residuo peligroso seleccionado.

5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA SELECCIONAR EL SITIO DE DISPOSICIÓN

5.2.1 Características geológicas

La geología estudia a los materiales rocosos en su formación, rasgos estructurales, composición y configuración de los rasgos físicos, sus relaciones mutuas, los procesos superficiales y subterráneos, así como la historia de las capas rocosas con base en las relaciones entre dichas capas, los sedimentos superficiales, la morfología, el desarrollo evolutivo de los organismos y sus relaciones con el ambiente contenidas en registros sedimentarios y en las antiguas relaciones geográficas (Legget y Karrow, 1986).

Por lo general las rocas son agregados de dos o tres minerales principales. Las rocas se dividen de acuerdo a su origen en tres grupos: ígneas, metamórficas y sedimentarias (Bell, 1998). El ciclo de las rocas es la forma de ver los procesos que conectan los tres tipos principales de rocas de la Tierra y las relaciones existentes entre ellas. Este ciclo lo desarrolló James Hutton a finales del siglo XVIII, y se puede analizar en tres etapas principales. La representación gráfica de éste ciclo se puede observar en la figura 5.1.

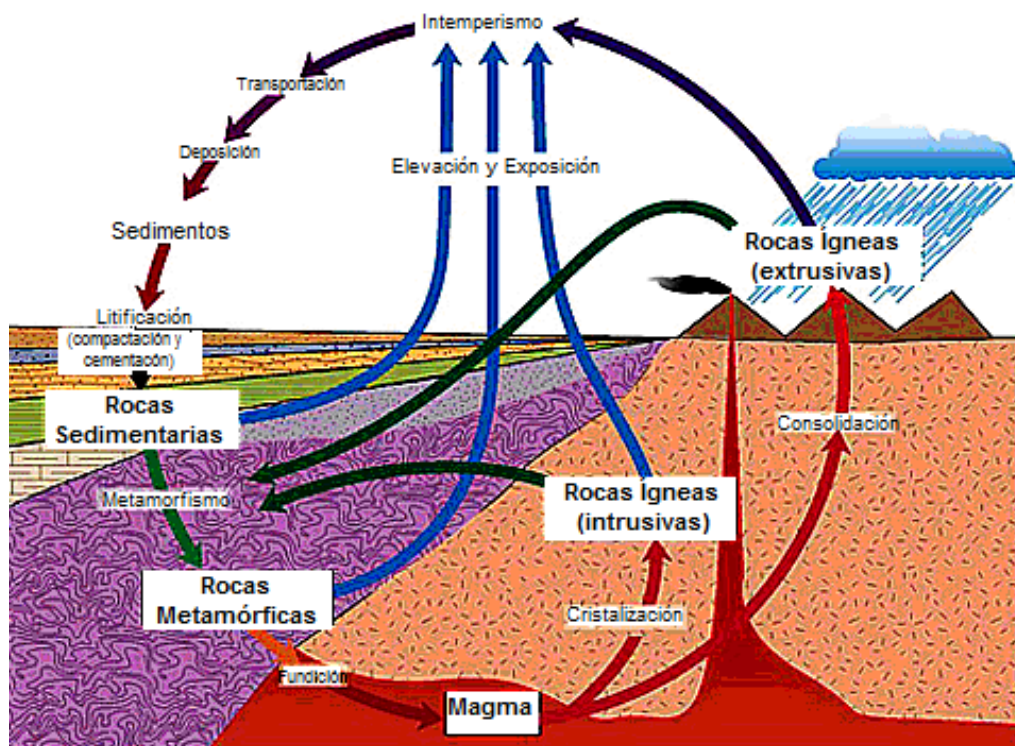


Figura 5.1 Ciclo de las rocas.

Fuente: Short, 2006.

La primera etapa del ciclo es la formación de rocas ígneas. Esto tiene lugar cuando el material fundido, llamado magma, se enfría y se solidifica en forma de cristales entrelazados. La segunda etapa del ciclo tiene lugar cuando las rocas ígneas quedan expuestas a diversos procesos en la superficie terrestre, como meteorización, erosión, transporte y sedimentación. Estos fenómenos disgregan el material de las rocas en diminutas partículas que son transportadas y se acumulan como sedimentos en los océanos y las cuencas lacustres. Estos depósitos sedimentarios quedan compactados por el peso de las sucesivas capas de material y también pueden quedar cementados por la acción del agua que llena los poros. Como consecuencia, los depósitos se transforman en roca en un proceso llamado litificación. Son rocas sedimentarias las areniscas y calizas. La tercera etapa del ciclo tiene lugar cuando las rocas sedimentarias quedan enterradas a gran profundidad o se ven afectadas por la formación de montañas (orogénesis), que se asocia con movimientos de las placas de la corteza terrestre. Quedan de esta forma expuestas a distintos grados de presión y calor y así se transforman en rocas metamórficas. De esta forma, la arcilla se convierte en pizarra, y el granito puede transformarse en gneis; una forma de caliza se convierte en mármol cuando se ve sometida a fenómenos metamórficos. El ciclo se cierra en la cuarta etapa, cuando las rocas metamórficas quedan sometidas a niveles de calor y presión aún mayores y se transforman en ígneas. El orden del ciclo de las rocas no es rígido, de tal forma que, una roca ígnea puede transformarse en metamórfica por efecto del calor y la presión sin pasar por la fase sedimentaria. Asimismo, las rocas sedimentarias y metamórficas pueden convertirse en material que forma nuevas rocas sedimentarias (Tarbuck y Lutgens, 1999).

En la figura 5.2 se indica el nombre de los principales tipos de roca en cada uno de los tres principales grupos de rocas.

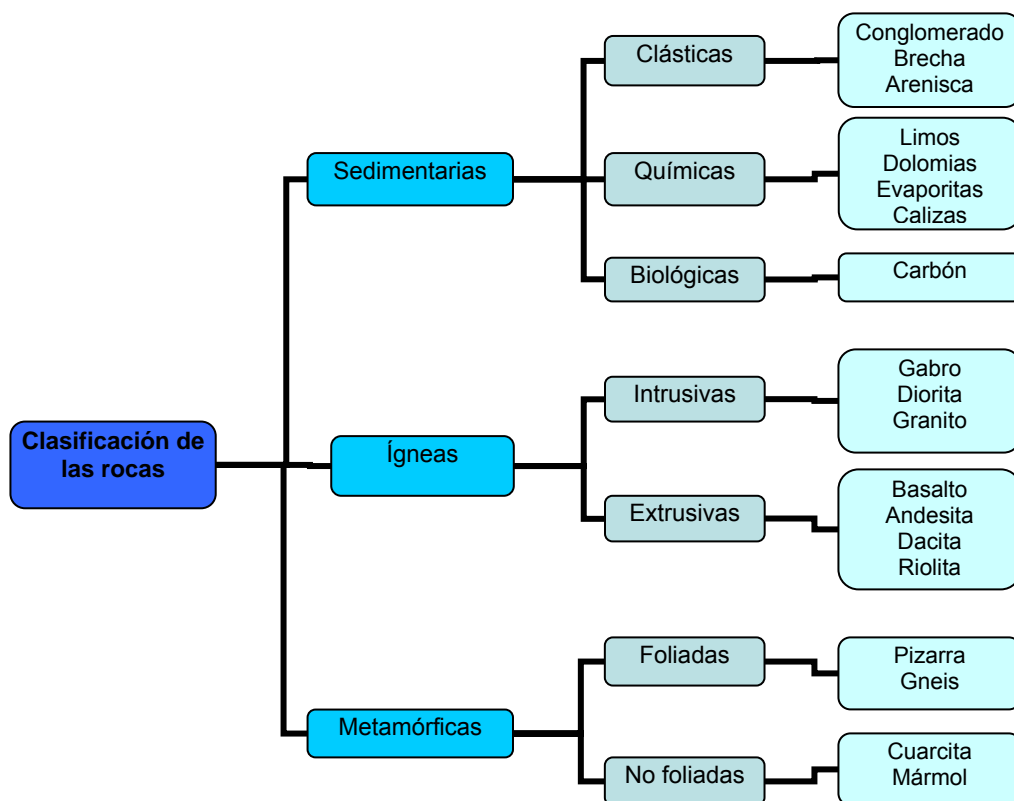


Figura 5.2 Clasificación de las rocas.

Fuente: Short, 2006.

En la figura 5.3 se presenta un mapa simplificado que muestra los rasgos geológicos de México.

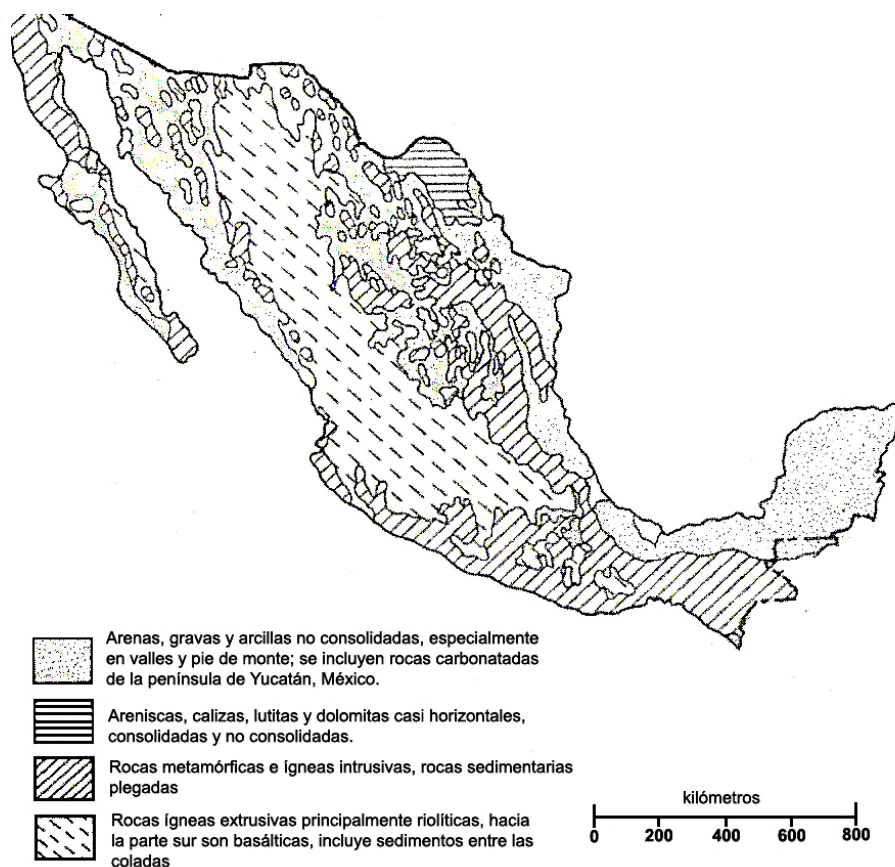


Figura 5.3 Rasgos geológicos de México.

Fuente: Price, 2003.

5.2.1.1 Rocas ígneas

Las rocas ígneas se forman cuando el magma se solidifica. El magma se desarrolla en la corteza o en las capas más altas del manto de la Tierra. Las rocas ígneas están compuestas principalmente de minerales de silicio. Además, las seis familias llamadas olivinos, piroxenos, anfíboles, micas, feldspatos y minerales de silicio, son cuantitativamente los constituyentes más importantes. Las rocas ígneas se pueden dividir de acuerdo a su modo de ocurrencia en intrusivas y extrusivas (Bell, 1998).

Las rocas intrusivas o plutónicas son aquellas rocas ígneas que se derivan de un magma solidificado a grandes profundidades y altas temperaturas (Grove, 2000); esta condición favorece el mantenimiento de un magma relativamente fluido durante largos períodos de tiempo, con cambios de temperatura muy graduales durante el proceso de enfriamiento; por esta razón, los minerales que se van formando desarrollan una masa de cristales grandes y bien definidos que ocupan todo el espacio disponible y dan origen a una roca de textura granular relativamente gruesa o fanerítica (Tarbuck y Lutgens, 1999). Este tipo de rocas comprende al granito, la cuarzodiorita y el gabro, entre otros.

Las rocas extrusivas, también llamadas efusivas o volcánicas, se pueden desarrollar a partir de un magma que se solidifica en la superficie terrestre. Este enfriamiento es rápido, por lo cual no hay tiempo para que se formen cristales grandes desarrollándose una textura conocida como afanítica, es decir, de cristales no observables a simple vista (Tarbuck y Lutgens, 1999). Dentro de esta clasificación se encuentran rocas como la riolita, la andesita y el basalto; se presentan también algunas rocas formadas, principalmente, por vidrio volcánico (material sin estructura interna), las cuales, debido a su enfriamiento extremadamente rápido, no forman cristales y por tanto desarrollan una textura vítrea, como es el caso de la obsidiana y la pumita (piedra pómez) (Jaramillo, 2002).

También se forman rocas extrusivas por la litificación de materiales que componen depósitos piroclásticos y son llamadas rocas piroclásticas. Cashman *et al.* (2000) definen a un piroclasto como todo fragmento sólido que es expulsado por los volcanes durante sus erupciones. Los depósitos piroclásticos se originan por la acumulación de los productos de la fragmentación de un magma o de la acción directa de un magma sobre las rocas preexistentes en las estructuras volcánicas. Estas rocas se clasifican, teniendo en cuenta el tamaño de las partículas o piroclastos que las forman, en aglomerados o brechas volcánicas, rocas de lapilli y tobas (Jaramillo, 2002).

Además de los dos tipos de roca antes mencionados, se pueden encontrar rocas hipoabisales, las cuales se forman a partir de magmas que se solidifican en condiciones de profundidad intermedias a los dos grupos anteriores. Algunos minerales son grandes, bien definidos y se llaman fenocristales, mientras que otros no alcanzan tal desarrollo; por esto, la roca adquiere una textura en la cual se ven los fenocristales embebidos en una masa de textura afanítica o vítrea, llamada matriz; esta textura se llama porfídica y las rocas que la presentan se llaman pórfidos (Tarbuck y Lutgens, 1999).

5.2.1.2 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas se derivan de los tipos de rocas preexistentes, y han experimentado cambios mineralógicos, estructurales y de textura. Estas alteraciones se han efectuado por cambios que tuvieron lugar en los ambientes físico y químico en los cuales existían las rocas. Las condiciones cambiantes de temperatura y presión son los agentes primarios que provocan las reacciones metamórficas en las rocas. Los minerales individuales son estables hasta condiciones límite de temperatura y presión, lo que significa que, cuando estos límites se exceden, se llevan a cabo ajustes mineralógicos para establecer un equilibrio con el nuevo ambiente (Bell, 1998). De acuerdo con Tarbuck y Lutgens (1999) lo anterior puede manifestarse de tres formas:

- *Pizarrosidad*: son capas paralelas, delgadas y planas formadas por microcristales de micas. Los planos de foliación no son apreciables a simple vista.
- *Esquistosidad*: son láminas delgadas formadas por la orientación de minerales de tamaño mayor que en la pizarrosidad y que le dan a la roca un aspecto escamoso.
- *Neisoidad*: es un bandeamiento de la roca originado por la segregación de minerales en el cual cada banda tiene una composición mineralógica definida y diferente de la adyacente.

En las rocas que originalmente eran monomineralógicas, el metamorfismo produce un reordenamiento de los minerales que no conlleva a foliación y, por tanto, la roca metamórfica producida tiene una apariencia masiva (Jaramillo, 2002).

Con base en el marco geológico se pueden distinguir dos tipos principales de metamorfismo: local y regional. El primero de ellos incluye al metamorfismo térmico o de contacto, y el segundo se refiere a un metamorfismo que generado en una región dada. El metamorfismo térmico ocurre alrededor de las intrusiones ígneas, por lo que el principal factor que controla la reacción es la temperatura. El metamorfismo regional de las rocas ocurre en las zonas precámbricas y en las raíces erosionadas de los pliegues de las montañas. Como tal, se puede extender sobre cientos o incluso miles de kilómetros cuadrados. El metamorfismo regional comprende a los procesos de cambio de temperatura y esfuerzos. De hecho, el metamorfismo regional puede incluir temperaturas superiores a un máximo de 800 °C, y las presiones de confinamiento generalmente están en un exceso de 3 kilobares. Más aún, las temperaturas y presiones conducentes a un metabolismo regional pueden mantenerse durante millones de años (Bell, 1998).

5.2.1.3 Rocas sedimentarias

La mayoría de las rocas sedimentarias están compuestas de material detrítico derivado de la falla de las rocas preexistentes. En efecto, estos tipos clásticos constituyen del 80% al 95% de todas las rocas sedimentarias. Las rocas sedimentarias no clásticas son producto de la precipitación química y

bioquímica, mientras que otras son de origen orgánico. Una característica común de todas las rocas sedimentarias es que fueron depositadas, y esto contesta a sus características más notables, esto es, su estratificación. Sin embargo las rocas sedimentarias solo conforman el 5% de la corteza terrestre, este tipo de rocas cubre tres cuartas partes del área continental y la mayor parte del suelo oceánico (Bell, 1998).

El proceso de falla incluye al intemperismo y la erosión, y cada ciclo de erosión está acompañado de un ciclo de sedimentación. Las partículas involucradas comúnmente se han sometido a una cantidad variada de transportación, el cual ha tenido un efecto sobre su tamaño y forma. La composición de las rocas sedimentarias clásticas depende de la composición del material parental¹³, la estabilidad de sus componentes minerales, el tipo de acción a la cual ha sido sujeta y durante cuanto tiempo ha sufrido dicha acción. Para transformar un sedimento no consolidado en una roca sólida, éstas deben someterse al proceso de litificación. La litificación incluye la consolidación y la cementación (*Op. Cit.*).

Las rocas sedimentarias clásticas están compuestas de conglomerados, brechas, areniscas, limolitas y arcillolitas (tales como la lutita y la arcilla). Las arcillolitas son las más comunes de este tipo de rocas. Las rocas calizas son de origen poligenético, algunas son clásticas, otras son resultado de precipitaciones químicas o bioquímicas y otras orgánicas, tales como las rocas calizas coralinas. Los depósitos evaporíticos se forman por precipitación del agua salina (*Op. Cit.*).

Las rocas evaporíticas.

Cuantitativamente los depósitos evaporíticos son importantes como sedimentos. Se forman por la precipitación de las aguas salinas de los mares interiores o de los lagos en las zonas áridas. Las rocas evaporíticas presentan grados variables de deformación plástica antes de fallar. Así, en una roca de sal el esfuerzo de fluencia puede ser tan pequeño como un décimo del esfuerzo último de compresión, mientras que la anhidrita experimenta deformaciones plásticas comparativamente más pequeñas antes de su ruptura. La deformación progresiva para cualquiera puede representar entre el 20% y 60% de la falla de tensión cuando estas rocas evaporíticas son sujetas a pruebas extendidas de deformación progresiva (Bell, 1981; Bell, 1994). Las rocas de sal son más propensas a la deformación progresiva. Langer (1982) propuso un modelo reológico para el comportamiento geológico de la roca de sal con el tiempo. Inicialmente, la deformación progresiva primaria ocurre conforme la roca de sal es sujeta a carga, la tasa de deformación progresiva disminuye con el tiempo. Durante la etapa de la deformación progresiva secundaria, la tasa de deformación progresiva está relacionada con las condiciones de cantidad de esfuerzo y temperatura. Bajo una carga constante, la falla ocurre cuando el esfuerzo, la tasa de deformación progresiva y la temperatura se combinan de una manera dada. La resistencia a la falla aumenta con el incremento de las condiciones de confinamiento.

5.2.1.4 Índice de calidad de roca

El índice de calidad de roca (RQD por sus siglas en inglés) es un parámetro extremadamente útil que relaciona la evaluación de la masa rocosa con una variedad de propósitos de ingeniería. Este índice fue desarrollado por Deere *et al.* (1967). El RQD es una relación empírica que originalmente involucraba una medición de núcleos extraídos de diámetro NX (54,7 mm ó 2,15 in) obtenidos mediante perforación a través de las formaciones rocosas. Del total del núcleo extraído, se suman las longitudes de las piezas de 0,10 m o mayores y el resultado se divide por la longitud total del núcleo. Cuando el resultado se expresa en forma de porcentaje, se obtiene el RQD. La tabla 5.1 proporciona las relaciones entre el RQD y la calidad de la roca (Hasan, 1995).

¹³ Mineral o material orgánico, no consolidado y más o menos intemperizado o meteorizado, desde el cual el suelo se desarrolla por procesos pedogenéticos (hidrolización, oxidación, etc.).

Tabla 5.1 El RQD y la calidad de la roca.

RQD (%)	CALIDAD DE LA ROCA
0 – 25	Muy pobre
25 – 50	Pobre
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Excelente

Fuente: Hasan, 1995.

Hatheway (1990), en una discusión de los usos representativos del RQD en la mecánica de rocas, indica que un RQD bajo, en una masa rocosa, corresponde a rutas de flujo de contaminantes, debido a que las fracturas facilitan el flujo del agua subterránea.

5.2.2 Características hidrológicas

La hidrología es una ciencia de la tierra. Abarca la ocurrencia, distribución, movimiento, y propiedades del agua de la Tierra y sus relaciones ambientales. Las áreas estrechamente relacionadas con la hidrología incluyen a la geología, climatología, meteorología y oceanografía. (Viessman *et al.*, 1989)

El ciclo hidrológico se considera el concepto fundamental de la hidrología, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. Ver la figura 5.4.

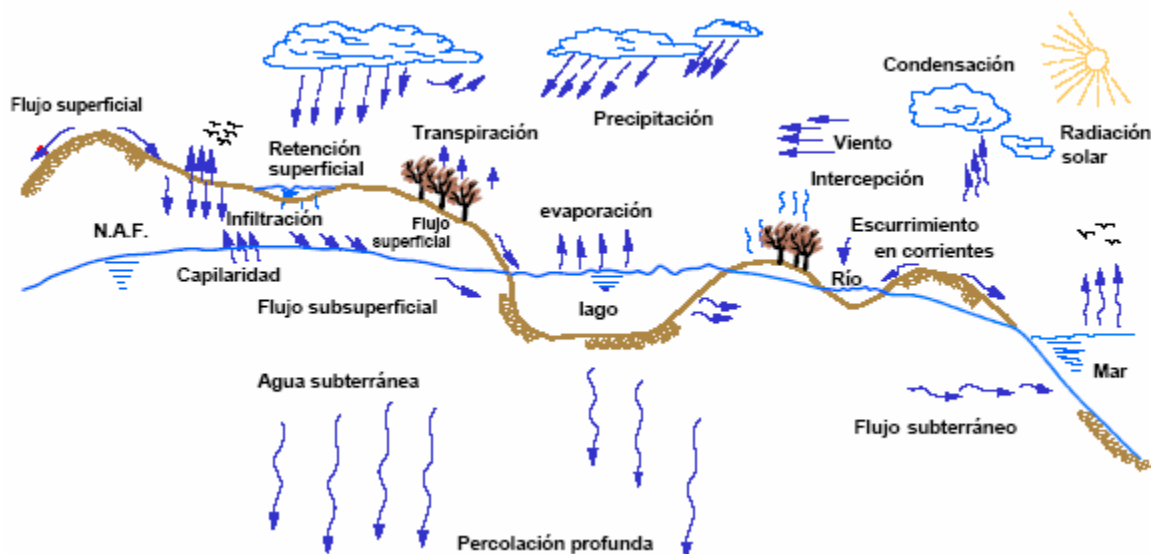


Figura 5.4 Ciclo hidrológico.

Fuente: Aparicio, 1999.

El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua que se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación (lluvia, granizo, nieve, etc.). Durante su trayecto a la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte la absorben las plantas y posteriormente la transpiran, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia

zonas profundas del suelo (precolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar. (Aparicio, 1999; Viessman *et al.*, 1989)

5.2.2.1 Hidrología superficial

Las zonas de inundación son aquellas zonas, normalmente secas, que quedan sumergidas temporalmente, como consecuencia de una aportación inusual de agua superior a la que es habitual en esa franja. Las zonas de inundación se pueden clasificar como (Aparicio, 2004):

- Zonas de inundación frecuente: son aquellas zonas en las que la avenida de cincuenta años producirá graves daños a núcleos urbanos.
- Zonas de inundación ocasional: son aquellas zonas en las que la avenida de cien años producirá graves daños a núcleos urbanos.
- Zonas de inundación excepcional: son aquellas zonas en las que la avenida de quinientos años producirá graves daños a núcleos urbanos.

En la figura 5.5 se muestran la zonificación por peligro de inundación en México.

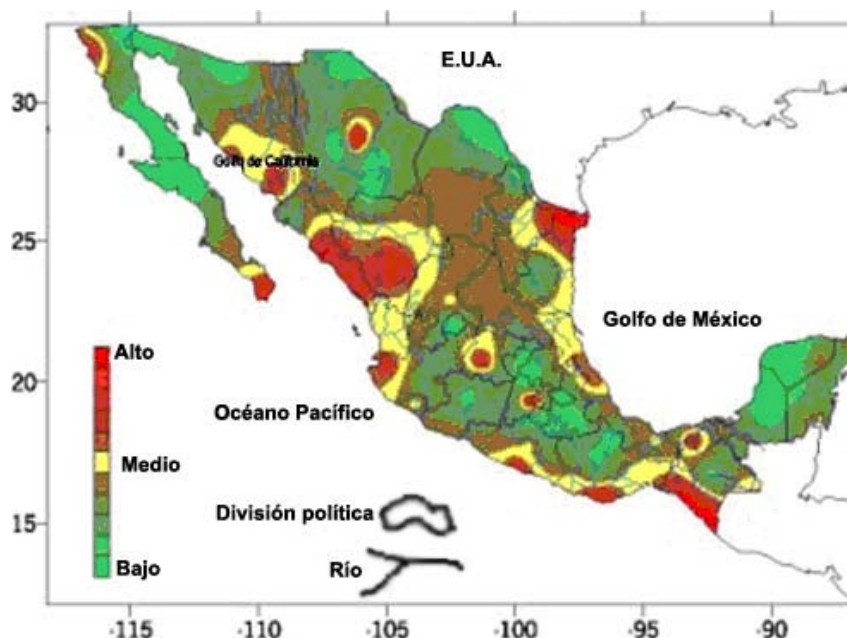


Figura 5.5 Zonas de peligros por inundaciones en la República Mexicana.

Fuente: CENAPRED, 2001a.

Así como el ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología, la cuenca hidrológica es su unidad fundamental de estudio. Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre de ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Lo anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas también existe una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. Por esta razón se hace la aclaración de que la definición anterior es válida si la superficie fuera impermeable. De acuerdo al tipo de salida que presente la cuenca, se puede clasificar en endorreicas y exorreicas. En la primera el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca, y por lo general es un lago; en la segunda, la salida reencuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar, tal como se ilustra en la figura 5.6. (Aparicio, 1999)

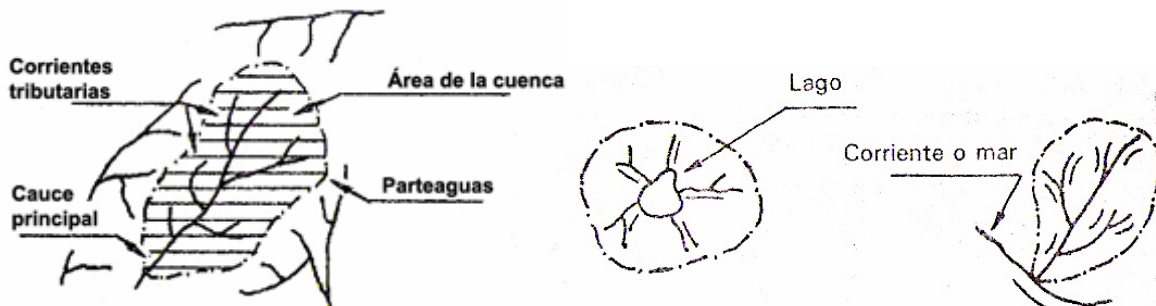


Figura 5.6 Elementos de una cuenca (lado izquierdo) y tipos de cuencas (al centro: cuenca endorreica; a la derecha: cuenca exorreica).

Fuente: Aparicio, 1999.

A continuación se describe brevemente las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia para sus efectos en la relación precipitación-escorrentía. El parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas. El área de la cuenca es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas. Hidrológicamente, las cuencas se pueden clasificar como pequeñas o grandes. El criterio para decir si una cuenca es pequeña o grande debe estar basado en su respuesta a las tormentas. La corriente principal de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma. Nótese que esta definición se aplica únicamente a las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se llaman cuencas tributarias o subcuencas. Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación. Un indicador del grado de bifurcación es el orden de la corriente, el cual indica la cantidad de tributarios¹⁴ con los que cuenta. De esta forma, si el orden de la corriente de mayor orden es k se dice que la cuenca es de orden k . Otros indicadores del grado de bifurcación o eficiencia de una cuenca son la densidad de corrientes D_s , definida como el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área y la densidad de drenaje D_d , definida como la longitud de corrientes por unidad de área. (Aparicio, 1999; Martínez, 2000)

Las corrientes se pueden clasificar de varias maneras, pero las más interesantes en ingeniería hidrológica son: (Op. Cit.)

- a) Por el tiempo en que transportan agua.
 1. *Perennes*: siempre llevan agua, excepto en sequías extremas. Siempre están alimentadas, totalmente o en parte, por el agua subterránea, es decir, son efluentes.
 2. *Intermitentes*: llevan agua la mayor parte del tiempo, especialmente cuando llueve.
 3. *Efímeras o influentes*: sólo llevan agua cuando llueve o inmediatamente después.
- b) Por su posición topográfica o edad geológica.
 1. *De montaña o juveniles*: característicos de cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas y, debido a las altas velocidades que alcanza el agua, sus cauces están generalmente formados por cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos.
 2. *De transición o maduros*: presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderadas y sus cauces están formados básicamente por grava con algo de cantos rodados y arena.
 3. *De planicie o viejos*: se encuentran en cotas cercanas al nivel del mar, presentan numerosos meandros debido a las bajas velocidades y su cauce se forma por arenas y finos.

¹⁴ Un tributario es una corriente que alimenta a otra corriente.

5.2.2.2 Hidrología subterránea

La *porosidad total* del suelo es el volumen de éste que no está ocupado por sólidos; es el volumen que hay disponible en el suelo para los líquidos y los gases. La distribución del espacio poroso depende de la composición y arreglo de la fracción sólida, es decir, de la textura, del contenido de materia orgánica y de la estructura, definiéndose dos tipos de espacios porosos (Jaramillo, 2002):

- *Microporosidad o porosidad textural*: está compuesta por el volumen de los poros más finos que tiene el suelo y que, en su mayor cantidad se encuentran en el interior de los agregados.
- *Macroporosidad o porosidad estructural*: es el volumen de poros grandes del suelo, los cuales se encuentran, en mayor proporción, ubicados entre los agregados.

La *permeabilidad* representa la velocidad a la que un fluido puede pasar a través de los poros de un sólido. Si el grado de permeabilidad de un terreno es alto, el agua de la lluvia penetrará fácilmente por sus poros. En cambio, si la permeabilidad es baja, el agua de la lluvia tenderá a acumularse en la superficie o a desplazarse por la misma, si el terreno no está nivelado. Las rocas ígneas y metamórficas, debido al modo como se formaron, generalmente no tienen espacios abiertos (vacíos) entre los sólidos (minerales). En otras palabras, carecen de porosidad primaria, definida como la porosidad que se desarrolla en las rocas durante su formación. Las rocas sedimentarias poseen porosidad primaria. Sin embargo, todas las rocas desarrollan juntas y otras discontinuidades que les imparten una porosidad secundaria (Hasan, 1995).

La *conductividad hidráulica* es una medida de que tan rápido fluye el agua a través de ciertas capas de suelo y roca. La conductividad hidráulica es más grande en materiales porosos, tales como las arenas, gravas, o rocas fracturadas que en los suelos arcillosos o en las rocas sólidas. La porosidad es una medida de la cantidad de espacios abiertos en el suelo o en las rocas que pueden contener agua (Ward y Trimble, 2004).

El *escurrimiento* se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el escurrimiento superficial. Una parte del agua precipitada que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento subsuperficial; la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escurrimiento subterráneo. De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo. El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar). Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base. El escurrimiento subsuperficial puede ser tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo, por ello es difícil distinguirlo de los otros dos (Aparicio, 1999; Martínez, 2000).

Un *acuífero* es una formación geológica, grupo de formaciones o parte de una formación que contiene material saturado y suficientemente permeable para proveer de cantidades significativas de agua a pozos y manantiales. En ocasiones se presentan por debajo del nivel freático una o más capas de material de baja conductividad hidráulica. El agua que se infiltra se detiene por esta capa para formar una lente de agua, la cual generalmente es de extensión limitada y se encuentra sobre la zona de saturación del acuífero principal. A este tipo de cuerpo se le llama acuífero colgado (a su límite superior, nivel freático colgado) debido a que el agua subterránea en el lente está colgada por arriba de la zona saturada. En un acuífero no confinado o libre, la parte superior de la zona saturada – el nivel freático – está a la presión atmosférica. A cualquier profundidad por debajo del nivel freático, la presión es más grande que la atmosférica, y en cualquier punto arriba de este nivel la presión es menor que la atmosférica. En un acuífero confinado, el espesor efectivo del acuífero se encuentra entre dos capas de baja permeabilidad, y en cualquier lugar a presión es mayor que la atmosférica. En ocasiones a los acuíferos confinados se

les llama acuíferos artesianos. El término artesiano¹⁵ se aplicó originalmente a los pozos que penetraban acuíferos en los que la superficie potenciométrica¹⁶ se encontraba por arriba del nivel del terreno, de manera que al construirse el pozo éste producía agua sin necesidad de bombear. Uno de los muchos conceptos erróneos que se manejan sobre aguas subterráneas es el de que los pozos que se perforan, no los excavados, son “artesianos” (Price, 2003).

A profundidades menores pueden existir formaciones de roca que limitan acuíferos por arriba o debajo de ellos, pero que son poco permeables para ser denominadas acuíferas. Estas unidades geológicas suelen contener agua, es decir, son porosas, pero no permiten al agua moverse a través de los poros bajo los gradientes hidráulicos comunes; a tales unidades se les llama en ocasiones acuícludos. Existen otras unidades que permiten al agua moverse a través de ellas, pero en caudales mucho menores que los de acuíferos adyacentes; en particular, permitirán el flujo vertical de agua de los acuíferos que se encuentren arriba o abajo; a este tipo de unidades se propuso denominarlos como acuitardos (*Op. Cit.*).

Las fracturas también son importantes para el movimiento del agua. Son las responsables de la recarga del agua subterránea en varios escenarios hidrológicos. El agua que pasa a través de las fracturas no está purificada en la misma forma en que lo estaría si se hubiese movido por suelo ligeramente compactado y material geológico poroso como la arena o la grava, esto es una consecuencia grave cuando se reconoce la clase de contaminantes que se pueden mover con el agua (Ward, 2004).

El agua que viaja debajo de la superficie cruzando materiales de granulometría fina vía las fracturas hacia los acuíferos de agua subterránea subyacentes se dice que se mueven a través una porosidad secundaria o de doble bloque en lugar de pasar por una porosidad primaria (como en el caso de los espacios entre los gránulos de material glacial o aluvial). Este dominio de la porosidad secundaria provoca que la tasa de drenaje gravitacional sea muy rápida, alcanzando dos o tres veces más rápido la magnitud de la conductividad hidráulica medida en laboratorio basada en la porosidad primaria en poros de material no consolidado (McKay *et al.*, 1993 y Haefner, 2000 citados por Ward, 2004). El movimiento a través de las rocas fracturadas puede ser aún más rápido.

Rápidamente se reconoció que el agua que atraviesa las juntas de las rocas, planos horizontales, y fracturas se mueve mucho más rápido que a través de la matriz rocosa (Ward, 2004). Se han desarrollado ecuaciones analíticas y modelos por computadora para flujo de agua subterránea en roca fracturada; sin embargo, aún no existe un consenso acerca del mejor método. Las tres aproximaciones más comunes son (Wu, 2002 citado por Ward, 2004):

- 1) Modelos de porosidad dual.
- 2) Mapeo discreto de fracturas individuales.
- 3) Modelación en material poroso equivalente.

5.2.3 Características climatológicas

La *meteorología* es el estudio de los fenómenos atmosféricos. El *viento* es aire en movimiento. Su velocidad se mide mediante anemómetros o anemógrafos y su dirección por medio de veletas. Generalmente, se le llama “viento” sólo a la componente horizontal del movimiento del aire, pues el vertical casi siempre es muy pequeño. Las fuerzas que producen los vientos son fundamentalmente: la de presión, la debida a la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis), la centrípeta o ciclostrófica y la de fricción (Aparicio, 1999).

¹⁵ El término se deriva del sustantivo latino *Artesium*, empleado para designar la región de Artois, al noreste de Francia, donde se estudio por primera vez este fenómeno.

¹⁶ El término superficie potenciométrica fue propuesto por el Servicio Geológico de Estados Unidos para sustituir nombres dados con anterioridad, puede ser aplicado a acuíferos libres y confinados, de esta forma el nivel freático es una superficie potenciométrica.

Un viento que se forma cuando el flujo del aire es tal que se puede desprestigiar la fricción, y las isobaras son aproximadamente rectas, de tal modo que el radio de la curvatura de la trayectoria del viento es infinito, se denomina viento geostrófico. Cuando la fricción es desprestigiable, pero las isobaras son curvas, el componente ciclostrófico del viento es diferente de cero y entonces se tiene el llamado viento gradiente. Se sabe que la fuerza de Coriolis es pequeña en latitudes cercanas al ecuador. En estas latitudes donde se producen las corrientes de aire de alta velocidad típicas de los ciclones tropicales, en las que sólo intervienen las fuerzas de presión y ciclostrólicas. Al viento así generado se le llama viento ciclostrófico. El viento inercial se produce cuando, además de la fricción, se puede desprestigiar la fuerza debida al gradiente de presiones. En general, las cuatro fuerzas actúan combinadas en mayor o menor medida. Esto constituye el denominado viento real (Aparicio, 1999). En la figura 5.7 se muestra la zonificación de la velocidad de los vientos en la República Mexicana.

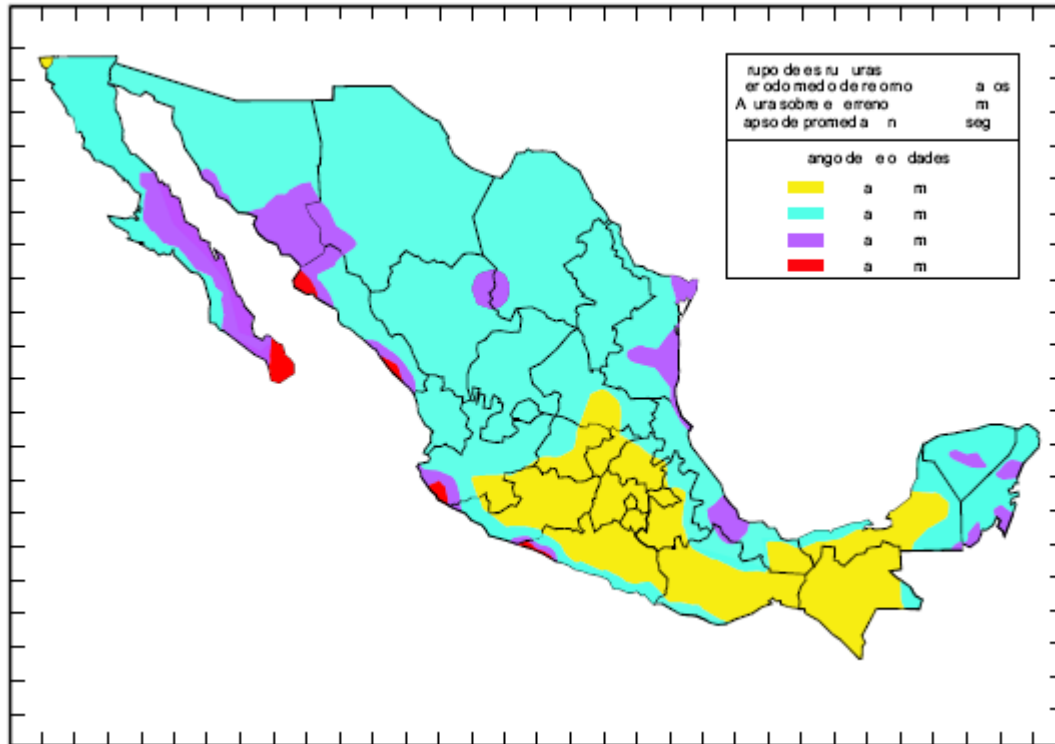


Figura 5.7 Zonificación de velocidades máximas en la República Mexicana basada en datos de la Comisión Federal de Electricidad.

Fuente: CENAPRED, 2001a.

El estudio de los fenómenos relacionados con el agua atmosférica se denomina *hidrometeorología*. El agua que se evapora de la tierra se almacena temporalmente como vapor de agua en la atmósfera. En la atmósfera, este vapor y pequeñas gotitas de agua forman nubes. Conforme la atmósfera se satura, el agua se libera de regreso a la tierra en alguna forma de precipitación (lluvia, nieve, aguanieve, o granizo) (Ward, 2004).

La *precipitación* lleva el nombre del factor que causó el ascenso del aire húmedo, mismo que se enfría conforme se alcanza mayores alturas. La lluvia ciclónica es resultado del levantamiento de aire por una baja de presión atmosférica. La lluvia de frente cálido se forma por la subida de una masa de aire caliente por encima de una de aire frío. La orográfica, se da cuando las montañas desvían hacia arriba el viento, sobre todo aquel proveniente del mar. Del mismo modo, la convectiva se forma con aire cálido que ascendió por ser más liviano que el aire frío que existe en sus alrededores. Esta última se presenta en áreas relativamente pequeñas, generalmente en zonas urbanas (CENAPRED, 2001a).

La distribución de la lluvia en la República Mexicana se muestra en la figura 5.8, en la cual se establecen las precipitaciones máximas en 24 horas y la precipitación media mensual.

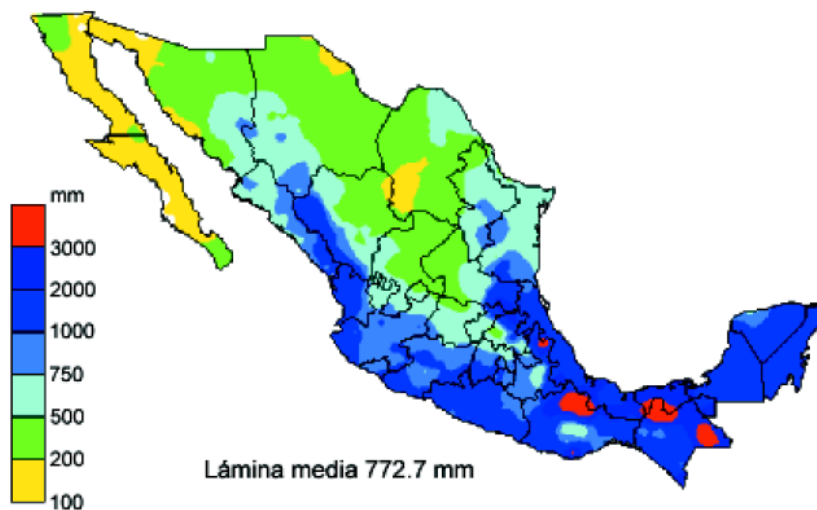


Figura 5.8 Zonificación de la precipitación media anual.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, citado en CENAPRED, 2001a.

La *evaporación* ocurre cuando el agua cambia del estado líquido a vapor. El incremento en la temperatura del aire y del agua, el viento, y la radiación solar aumentan las tasas de evaporación, mientras que un alto porcentaje de vapor de agua en el aire (alta humedad relativa) disminuye el potencial de evaporación (Ward, 2004).

La *transpiración* es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua la toman las plantas, naturalmente, del suelo. Este vapor de agua es un subproducto natural de la fotosíntesis. Debido a la dificultad en la separación de la evaporación y la transpiración usualmente se observan estos dos procesos como uno solo llamado evapotranspiración. Más de la mitad del agua que entra al suelo se regresa a la atmósfera mediante la evapotranspiración (*Op. Cit.*).

El *uso consuntivo* es la combinación de la evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente el 1%), por lo que los términos evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos (Aparicio, 1999).

La *infiltración* se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia-escurrimiento. En general, el volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escurrimiento durante una tormenta dada, especialmente en cuencas con un grado de urbanización relativamente bajo. El proceso de infiltración depende de un gran número de factores, entre los que destacan (*Op. Cit.*):

- a) Textura del suelo.
- b) Contenido de humedad inicial.
- c) Contenido de humedad de saturación.
- d) Cobertura vegetal.
- e) Uso del suelo.
- f) Aire atrapado.
- g) Lavado de material fino.
- h) Compactación.
- i) Temperatura, sus cambios y diferencias.

5.2.4 Aspectos ecológicos

Los factores relacionados con la protección de la flora y fauna, y de los recursos naturales en general, no deben considerarse como secundarios en el proceso de selección del sitio de confinamiento. De esta forma los sitios potenciales deberán ubicarse fuera de las zonas del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Zonas de Patrimonio Cultural, además de evitar afectar a las especies protegidas o en peligro de extinción. Todo ello con el fin de que los sitios potenciales tengan cualquier clase de impacto adverso en el ambiente.

5.2.5 Características sísmicas

Más del 80% de la actividad sísmica mundial tiene lugar en el Cinturón Circumpacífico, franja que incluye las costas de Asia y América, principalmente. El territorio nacional, asociado al Cinturón Circumpacífico, se encuentra afectado por la movilidad de cuatro placas tectónicas: la de Norteamérica, Cocos, Rivera y del Pacífico. En la figura 5.9 se muestra la configuración de estas placas; las flechas indican las direcciones y velocidades promedio de desplazamiento relativo entre ellas. La generación de los temblores más importantes en México se debe, básicamente, a dos tipos de movimiento entre placas. A lo largo de la porción costera de Jalisco hasta Chiapas, las placas de Rivera y Cocos penetran por debajo de la placa Norteamericana, ocasionando el fenómeno de subducción. Por otra parte, entre la placa del Pacífico y la placa Norteamericana se tiene un desplazamiento lateral cuya traza, a diferencia de la subducción, es visible en la superficie del terreno; esto se verifica en la parte norte de la península de Baja California y a lo largo del estado de California, en los Estados Unidos de Norteamérica (CENAPRED, 2001b).



Figura 5.9 Principales placas generadoras de movimientos sísmicos en el país.

Fuente: CENAPRED, 2004.

Para comprender el origen de los sismos en la República Mexicana, se debe partir del hecho de que la litosfera está dividida en varias placas, cuya velocidad de desplazamiento es del orden de varios centímetros por año. El territorio mexicano se encuentra afectado por la interacción de cinco placas tectónicas, tal como se muestra en la figura 5.9. En los límites entre placas, donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto de la otra, generándose grandes esfuerzos en el material que las constituye. Si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca, o se vencen las fuerzas de fricción, ocurre una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada. Desde el foco o hipocentro, ésta se irradia en forma de ondas sísmicas, a través del medio sólido de la Tierra en todas direcciones. (CENAPRED, 2004)

Para comparar el tamaño de los terremotos, Richter definió una escala de magnitud. La manera de medir el tamaño real de un sismo tiene que ver con la cantidad de energía liberada y es independiente de la localización de los instrumentos que lo registren. La diferencia de un grado de magnitud entre dos sismos cualesquiera implica, en términos de energía liberada, una diferencia de 32 veces. Por tanto, es fácil notar que un sismo de magnitud 4, como los que llegan a ocurrir varias veces por semana a lo largo de la costa occidental de México, no es la mitad de uno de magnitud 8, el que se presenta una vez cada varias décadas en dicha región. La intensidad de un sismo en un lugar determinado, se evalúa mediante la Escala Modificada de Mercalli (ver tabla 5.2) y se asigna en función de los efectos causados en el hombre, en sus construcciones y en el terreno (CENAPRED, 2001a).

Tabla 5.2 Escala de intensidad Mercalli-Modificada abreviada.

Intensidad	Descripción
I	No es sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido sólo por muy pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos delicadamente suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido muy claramente en interiores, especialmente en pisos altos de los edificios, aunque mucha gente no lo reconoce como un terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos despiertan. Platos, ventanas y puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. Daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras comunes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente para resistir sismos; considerable, en edificios comunes bien construidos, llegando hasta colapso parcial; grande, en estructuras de construcción pobre. Los muros de relleno se separan de la estructura. Caída de chimeneas, objetos apilados, postes, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Expulsión de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Cierta dificultad para conducir automóviles.
IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras bien diseñadas pierden la vertical; daño mayor en edificios sólidos, colapso parcial. Edificios desplazados de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
X	Algunas estructuras bien construidas en madera, destruidas; la mayoría de estructuras de mampostería y marcos destruidas incluyendo sus cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI	Pocas o ninguna obra de albañilería quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcidos.
XII	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.

Fuente: Bolt, 1978, citado en CENAPRED, 2001b.

Como resultado de la superposición de todos los mapas de intensidades de sismos mexicanos disponibles hasta ahora se tiene la figura 5.10. Ésta despliega las intensidades máximas de 49 sismos de gran magnitud, que ocurrieron entre 1845 y 1985, la mayoría con magnitud superior a 7 (Figueroa, 1986 citado en CENAPRED, 2001a; Gutiérrez *et al.*, 1991). Aunque en este mapa global de intensidades máximas no están incluidos los efectos de todos los grandes sismos en ese periodo, la distribución de los temblores correspondientes se considera representativa de la sismicidad en México. Para el mismo periodo, se muestran intensidades sísmicas para la península de Baja California, sólo en los sitios donde se contaba con reportes. La forma y el tamaño de las áreas indicadas para esta zona no representan el

alcance total de los efectos del temblor. Así, es posible tener una apreciación útil de los diferentes niveles de peligro por sismo en nuestro país (CENAPRED, 2001a).

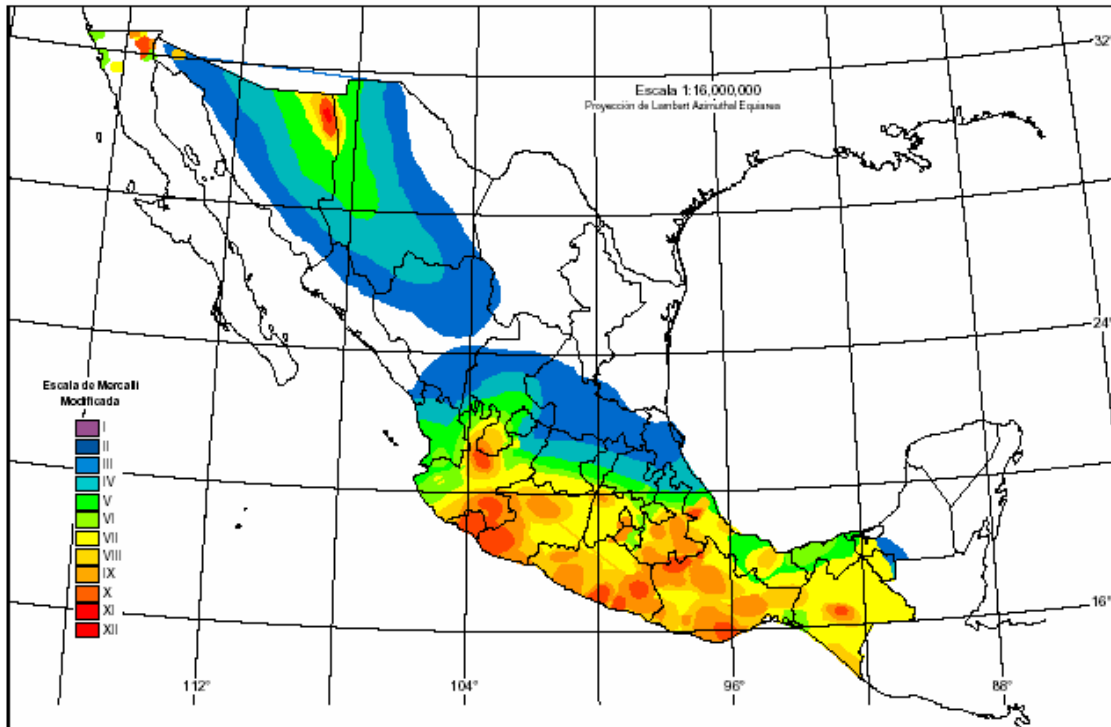


Figura 5.10 Mapa de intensidades de los sismos ocurridos entre 1845 y 1985 en México.
Fuente: CENAPRED, 2001a.

En la figura 5.11, se muestran los epicentros de los sismos de gran magnitud ($M \geq 7$), ocurridos durante el siglo XX en la República Mexicana. Aproximadamente el 77% de esos eventos tuvo su origen a profundidades menores que 40 km lo que, aunado a sus magnitudes y frecuencia de ocurrencia, implica un nivel de peligro considerable. Estos grandes sismos se concentran principalmente en la costa occidental, entre Jalisco y Chiapas, así como a lo largo del Golfo de California y parte norte de la península. La distribución de los epicentros muestra relación con las fronteras entre placas ilustradas en la figura 5.9. La gran mayoría de los sismos se origina por fricción entre placas; otros se deben a fracturas en el interior de una sola placa o a la presencia de fallas activas (*Op. Cit.*).

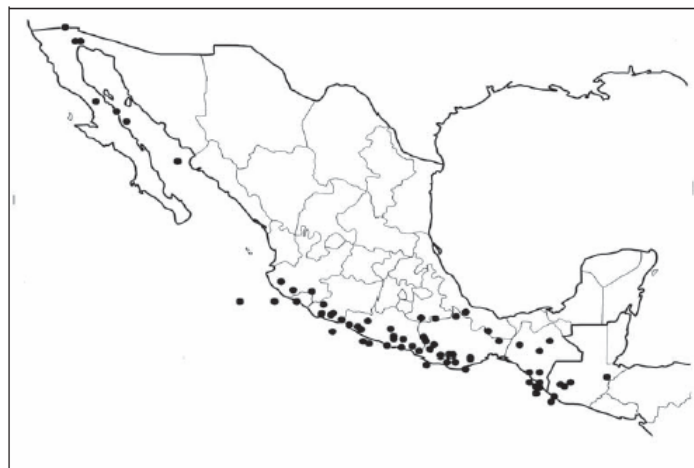


Figura 5.11 Epicentros de sismos de gran magnitud ($M \geq 7$) ocurridos durante el siglo XX en México.
Fuente: CENAPRED, 2001a.

Una manera cuantitativa de representar el peligro por grandes sismos, es el cálculo de aceleraciones máximas posibles del terreno. Para el caso de México, se ha observado que aquellas aceleraciones que rebasan el 15% del valor de la aceleración de la gravedad (g), producen daños y efectos de consideración, sobre todo para los tipos constructivos que predominan en México (CENAPRED, 2001a).

Para conocer el grado de peligro sísmico que tiene una región determinada, se recurre a la regionalización sísmica que, en el caso de México, se encuentra definida por cuatro niveles (ver figura 5.12). La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos, no se han reportado sismos grandes en los últimos 80 años y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al $0,10g$. En la zona D han ocurrido con frecuencia grandes temblores y las aceleraciones del terreno que se esperan pueden ser superiores al $0,70g$. Las zonas B y C, intermedias a las dos anteriores, presentan actividad sísmica con menor frecuencia o bien, están sujetas a aceleraciones del terreno que no rebasan el $0,70g$. Esta clasificación del territorio se emplea en los reglamentos de construcción para fijar los requisitos que deben seguir los constructores para diseñar las edificaciones y otras obras civiles de tal manera que éstas resulten suficientemente seguras ante los efectos producidos por un sismo (*Op. Cit.*).

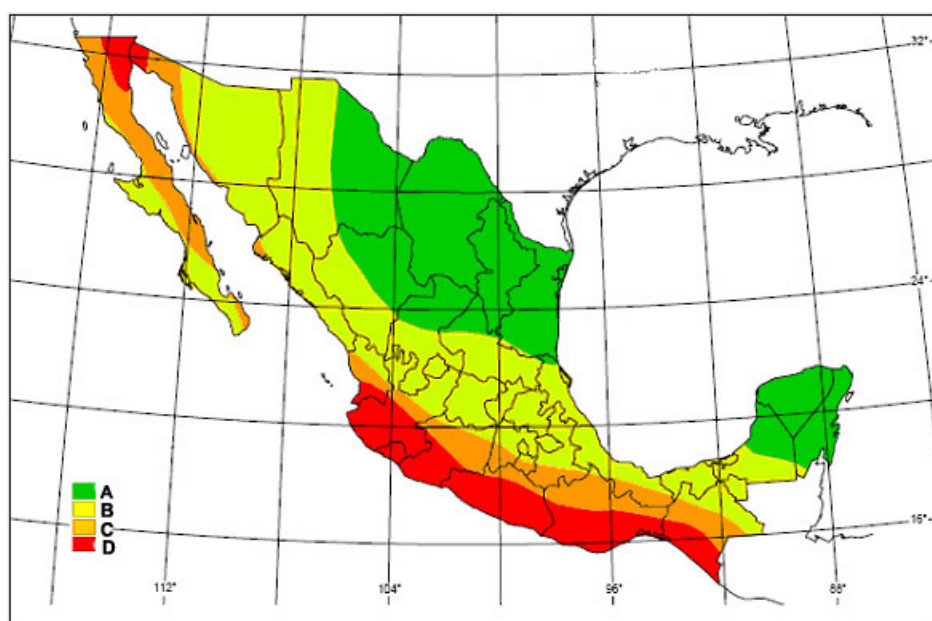


Figura 5.12 Regionalización Sísmica de México.
Fuente: CENAPRED, 2001a.

5.2.6 Crecimiento de centros urbanos y opinión pública

El incremento de los asentamientos humanos, la densidad poblacional, los movimientos migratorios, el cambio en el uso del suelo, el crecimiento de las zonas industriales y/o comerciales, así como el desarrollo de nuevas zonas industriales y/o comerciales tienen un amplio impacto en el crecimiento y desarrollo de los centros de población. En la selección de los sitios potenciales para la ubicación del confinamiento se debe tomar en cuenta la distancia a la cual éste se encuentra de los centros poblacionales con el fin de evitar contribuir en la contaminación auditiva del centro de población, evitar provocar congestionamientos en el tráfico local y evitar el impacto visual sobre los habitantes.

Por otra parte, la opinión pública juega un papel muy importante en el proceso de planeación, construcción y operación de cualquier confinamiento de residuos peligrosos, razón por la cual se debe de tomar en cuenta la opinión de los pueblos cercanos al sitio de disposición, se debe llegar a un acuerdo con la población y con las organizaciones ambientalistas con el fin de que el proyecto se pueda desarrollar con éxito.

5.2.7 Accesibilidad

Se busca que los sitios potenciales para el confinamiento cuenten con vías de comunicación transitables en cualquier momento y cuyas condiciones de seguridad sean buenas. Se debe considerar el tráfico local, las características de los caminos de acceso al sitio de confinamiento, las dimensiones de las unidades de transporte del residuo y de los vehículos de emergencia. Además, de acuerdo a la legislación mexicana se debe tomar en cuenta una región de seguridad de 500 m a cada lado de las carreteras federales y estatales.

5.3 ANÁLISIS DE LOS SITIOS POTENCIALES PARA LA DISPOSICIÓN DEL RESIDUO PELIGROSO

Debido a que el residuo peligroso a confinar está contaminado con hidrocarburos, además de que los principales campos de extracción de petróleo en México se encuentran ubicados en el estado de Veracruz y dado que se sabe que dicho estado cuenta con formaciones salinas, se presenta a continuación una descripción general del mismo, con la finalidad de identificar las zonas en las cuales existen domos salinos dentro de esta región del país.

5.3.1 Ubicación geográfica

Como se muestra en la figura 5.13, el estado de Veracruz se encuentra situado en la porción central de la vertiente del Golfo de México, entre los 17° 09' y 22° 28' de latitud norte y 93° 36' y 98° 39' de longitud oeste. La superficie total de su territorio es de 72 873 km². De ella 72 815 km² corresponden al macizo continental y los 58 km² restantes a la parte insular. Su longitud es de aproximadamente 800 km, su anchura oscila entre los 52 km y los 212 km, en tanto que su litoral se extiende a lo largo de 684 km, el cual representa el 3,7% de la superficie total de México. (INEGI, 2006a)



Figura 5.13 Ubicación geográfica del estado de Veracruz, México.

Fuente: Mapas de México, 2006.

El estado de Veracruz colinda al norte con el estado de Tamaulipas; al este con el Golfo de México y el estado de Tabasco; al sureste con el estado de Chiapas; al sur con el estado de Oaxaca y al oeste con los estados de Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí.

De acuerdo con el INEGI (2006b), Veracruz tiene una población de 7 110 214 habitantes, distribuidos en 212 municipios agrupados en 10 regiones que son:

- Región de la Huasteca Alta.
- Región de la Huasteca Baja.
- Región Totonaca.
- Región de Nautla.
- Región de la Capital.
- Región de Sotavento.
- Región de las Montañas.
- Región del Papaloapan.
- Región de los Tuxtlas.
- Región Olmeca.

La ubicación de las regiones antes mencionadas se muestra en la figura 5.14. Cabe mencionar que la población veracruzana significa el 6,9% de la población de la República Mexicana con una densidad de 96 habitantes por km², ocupando el tercer lugar a nivel nacional. (INEGI, 2006b)



Figura 5.14 Ubicación geográfica de las diez regiones del estado de Veracruz, México.
Fuente: Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005.

5.3.2 Fisiografía

El Estado de Veracruz abarca áreas que corresponden a siete provincias o regiones fisiográficas del país. Dichas regiones se describen a continuación:

- *Provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte.* Esta provincia se extiende paralelamente a las costas del Golfo de México, desde el río Bravo hasta la zona de Nautla, Veracruz. Los climas en esta región van de los secos cálidos y semicálidos del norte a los cálidos subhúmedos y húmedos del sur. La vegetación se ajusta a dicho patrón climático, con matorrales submontanos y

tamaulipecos en la porción boreal y selvas en la austral. En territorio veracruzano se encuentran áreas que corresponden a las subprovincias: Llanuras y Lomeríos y Llanura Costera Tamaulipeca. (INEGI, 2006a)

- ✦ Subprovincia de las Llanuras y Lomeríos. La mayor parte del sur de esta subprovincia queda incluida dentro del estado de Veracruz, donde abarca 20 792,50 km² de la superficie total estatal. En el norte de la entidad se encuentra gran parte de la cuenca baja del Pánuco, en la que dominan llanuras aluviales y salinas, inundables y con lagunas permanentes asociadas con lomeríos. Hacia el sur, hasta el valle de Tuxpan, siguen extensos sistemas de lomeríos suaves asociados con llanos y algunos con cañadas. Junto a la sierra, al occidente, se localiza el amplio valle de laderas tendidas por el que fluye el río Moctezuma. Al oeste, cerca de la sierra, hay mesetas constituidas con sedimentos antiguos. (*Op. Cit.*)
 - ✦ Subprovincia de la Llanura Costera Tamaulipeca. Esta subprovincia, dentro de la entidad, está representada por el sistema de topofomas denominado barras, que abarca una superficie de 369,81 km². (*Op. Cit.*)
- 🌍 Provincia de la Sierra Madre Oriental. Es fundamentalmente un conjunto de sierras menores de estratos plegados. En esta región, los climas varían en una amplia gama de temperatura y precipitación, desde los secos cálidos en el norte, hasta los semicálidos y templados subhúmedos del sur. La porción que se encuentra en Veracruz pertenece a la subprovincia Carso Huasteco. (INEGI, 2006a)
- ✦ Subprovincia del Carso Huasteco. Es una zona de sierras plegadas constituidas predominantemente por rocas calizas. La superficie que abarca esta región en la entidad es de 2 676,08 km². Regionalmente, la zona es conocida como Huasteca Veracruzana, en ella prevalecen los climas semicálido húmedo y cálido subhúmedo. Su territorio está surcado por algunos de los afluentes del río Tempoal, tributario del Pánuco. (*Op. Cit.*)
- 🌍 Provincia del Eje Neovolcánico. Esta provincia se puede caracterizar como una enorme masa de rocas volcánicas de diversos tipos, acumulada en numerosos y sucesivos episodios volcánicos que se iniciaron a mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás), y continuaron hasta el presente. Uno de sus rasgos característicos es la franja de volcanes que se extienden de oeste a este, casi en línea recta, más o menos sobre el paralelo 19. Otro rasgo esencial lo dan las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos. Los bosques de encinos y coníferas se desarrollan en la franja colindante con la Sierra Madre Oriental. Sobre el Golfo de México hay pequeñas áreas de bosque mesófilo y selva baja caducifolia. (*Op. Cit.*)
- ✦ Subprovincia de las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo. Sólo la porción más oriental de esta región penetra por el extremo noroeste de la entidad, donde abarca 278,19 km² y comprende parte de los municipios de Huayacocotla y Zacualpan. Es una zona de terrenos accidentados en la que dominan los sistemas de topofomas pequeña sierra compleja y lomerío de colinas redondeadas, constituidos principalmente por rocas basálticas. El clima que prevalece es templado húmedo. (*Op. Cit.*)
 - ✦ Subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac. En la entidad cubre una superficie de 2 103,52 km². En esta zona se encuentran el Cofre de Perote y las laderas orientales del Pico de Orizaba. También se localizan en esta zona algunas llanuras, lomeríos y mesetas. (*Op. Cit.*)
 - ✦ Subprovincia de la Sierra de Chinconquiaco. La mayor parte de esta subprovincia se encuentra dentro de Veracruz, donde ocupa una superficie de 6 699,21 km². Su territorio se alterna entre unidades de laderas abruptas y tendidas: además, desde el sur del cuerpo montañoso hasta el río Jamapa se presenta una zona de lomeríos de colinas redondeadas, la mayoría asociados con cañadas y algunos con mesetas. La zona costera presenta variedad de topofomas, en las que se incluyen dos mesetas lávicas y una prominencia de basalto columnar en Quiahuiztlán. (*Op. Cit.*)

- **Provincia de la Sierra Madre del Sur.** Esta región tiene una litología en la que cobran una importancia mucho mayor que en las del norte, las rocas intrusivas cristalinas y las metamórficas. La vegetación que sustenta es de selva baja caducifolia en la Depresión del Balsas. (INEGI, 2006)
 - ⊕ **Subprovincia de las Sierras Orientales.** Esta zona montañosa abarca desde la región de Orizaba, Veracruz, hasta Salina Cruz, Oaxaca, y se extiende en el sur entre este puerto y el de Pochutla. La parte norte, conocida como sierra de Zongolica, es menos abrupta que el resto de la subprovincia, en ella dominan las rocas calcáreas del Cretácico que le dan afinidad con la Sierra Madre Oriental. (Op. Cit.)

- **Provincia de la Llanura Costera del Golfo Sur.** Esta provincia, a diferencia de la del Golfo Norte, es una llanura costera de fuerte aluvionamiento por parte de los ríos, los más caudalosos del país, que la atraviesan para desembocar en la parte sur del Golfo de México. La mayor parte de su superficie, a excepción de la Discontinuidad Fisiográfica de Los Tuxtlas y algunos lomeríos bajos, está muy próxima al nivel del mar y está cubierta de material aluvial. (Op. Cit.)
 - ⊕ **Subprovincia de la Llanura Costera Veracruzana.** Casi toda esta subprovincia se localiza dentro de territorio veracruzano, y es la que ocupa mayor extensión, con 27 001,17 km², que representan el 37,29% de la superficie total estatal. Esta subprovincia se divide en tres grandes regiones: los sistemas de lomeríos del oeste, la llanura costera aluvial propiamente y los sistemas de lomeríos del sur y sureste. (Op. Cit.)
 - ⊕ **Subprovincia de las Llanuras y Pantanos Tabasqueños.** Esta subprovincia es surcada por diversos ríos, entre ellos el Grijalva y el Usumacinta, los más caudalosos del país; el Tonalá, el Chumpán y el Candelaria, al este. Tales ríos en la llanura presentan cursos inestables, debido a que sus cauces han sufrido cambios abruptos, por tal motivo, los aluviones recientes cubren en forma pareja casi toda la subprovincia. Las zonas inundables abarcan amplias extensiones del oriente, lugar donde abundan los lagos y pantanos permanentes. Sobre la margen occidental del río Tonalá se localiza la penetración de esta subprovincia en territorio veracruzano, del cual comprende una superficie de 373,72 km². En esta porción, los sistemas de topofomas representativos son las denominadas llanuras costeras inundables y valle de laderas tendidas. (Op. Cit.)
 - ⊕ **Discontinuidad Fisiográfica de la Sierra de Los Tuxtlas.** La sierra volcánica de Los Tuxtlas interrumpe en forma abrupta la continuidad de la Llanura Costera del Golfo Sur. Toda ella, con su extensión de 3 681,79 km², queda dentro del estado. Es de laderas tendidas en el oeste, escarpadas en el este y asociada siempre con lomeríos. Sobre la costa y hacia el sur, en la parte central de Los Tuxtlas, se tienen las grandes calderas gemelas de Sontecomapan y Catemaco. La mayor parte, del resto de la subprovincia, es de lomeríos de diversos tipos de materiales basálticos, asociados con cañadas. (Op. Cit.)

- **Provincia de la Cordillera Centroamericana.** Inicia en el Istmo de Tehuantepec y se extiende hasta la República de Nicaragua. Es un gran batolito ígneo emergido sobre el sitio de subducción de la Placa de Cocos. El clima predominante es cálido húmedo, pero en el sureste se registra el clima semicálido y hacia el noroeste el clima templado subhúmedo. Hay bosque de pino - encino en las partes más elevadas y selva alta perennifolia hacia el Pacífico y en las costas, excepto las del noroeste, donde se desarrolla selva baja caducifolia y sabanas. (Op. Cit.)
 - ⊕ **Subprovincia de las Sierras del Sur de Chiapas.** En la entidad se localiza sólo parte del sistema de topofomas denominado sierra de cumbres escarpadas, y comprende una extensión de 305,16 km². (Op. Cit.)

- **Provincia de las sierras de Chiapas y Guatemala.** En nuestro país abarca parte de los estados de Tabasco, Chiapas y Veracruz. Las sierras que las conforman son sierras plegadas. La parte mexicana es una sierra relativamente baja. En el norte de la provincia prevalecen climas semicálidos y cálidos húmedos, asociados los primeros con sabana y bosque de pino-encino, y los segundos con selva alta perennifolia. Al sur pasan a templados subhúmedos y cálidos subhúmedos. (Op. Cit.)

- ✦ Subprovincia de las Sierras del Norte de Chiapas. En Veracruz, la subprovincia ocupa una superficie de 1 556,96 km², los cuales corresponden a la porción sureste del municipio Las Choapas. Los sistemas de topoformas representativos son denominados sierra compleja, lomerío suave y valle abierto. (INEGI, 2006)
- ✦ Subprovincia de Los Altos de Chiapas. Dos de sus rasgos más notables son: las Lagunas de Montebello y el Cañón del Sumidero, por el cual corre el río Grijalva. Esta subprovincia comprende 3 535,15 km² de territorio veracruzano. En el extremo sureste de esta zona se localizan los sistemas de topoformas sierra plegada cuya altitud es de 1 350 m, y sierra baja, de 500 a 600 msnm. (*Op. Cit.*)

En la tabla 5.3 se presenta un resumen de dichas regiones fisiográficas así como el porcentaje aproximado que abarcan en el territorio de Veracruz. En la figura 5.15 se muestra un mapa con la distribución de las regiones fisiográficas de Veracruz.

Tabla 5.3 Provincias y subprovincias fisiográficas de Veracruz.

PROVINCIA	SUBPROVINCIA	% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
Sierra Madre Oriental	Carso Huasteco	4,93
Llanura Costera del Golfo Norte	Llanuras y Lomeríos	30,31
Eje Neovolcánico	Chiconquiaco	7,92
	Lagos y Volcanes de Anáhuac	3,14
Sierra Madre del Sur	Sierras Orientales	2,44
Llanura Costera del Golfo Sur	Llanura Costera Veracruzana	42,67
	Llanura y Pantanos Tabasqueños	0,85
	Sierra de los Tuxtlas ^a	4,53
Sierra de Chiapas y Guatemala	Sierras del Norte de Chiapas	2,89
Cordillera Centroamericana	Sierras del Sur de Chiapas	0,32

Nota: ^a Discontinuidad fisiográfica.

Fuente: INEGI. Carta fisiográfica, escala 1:1 000 000.

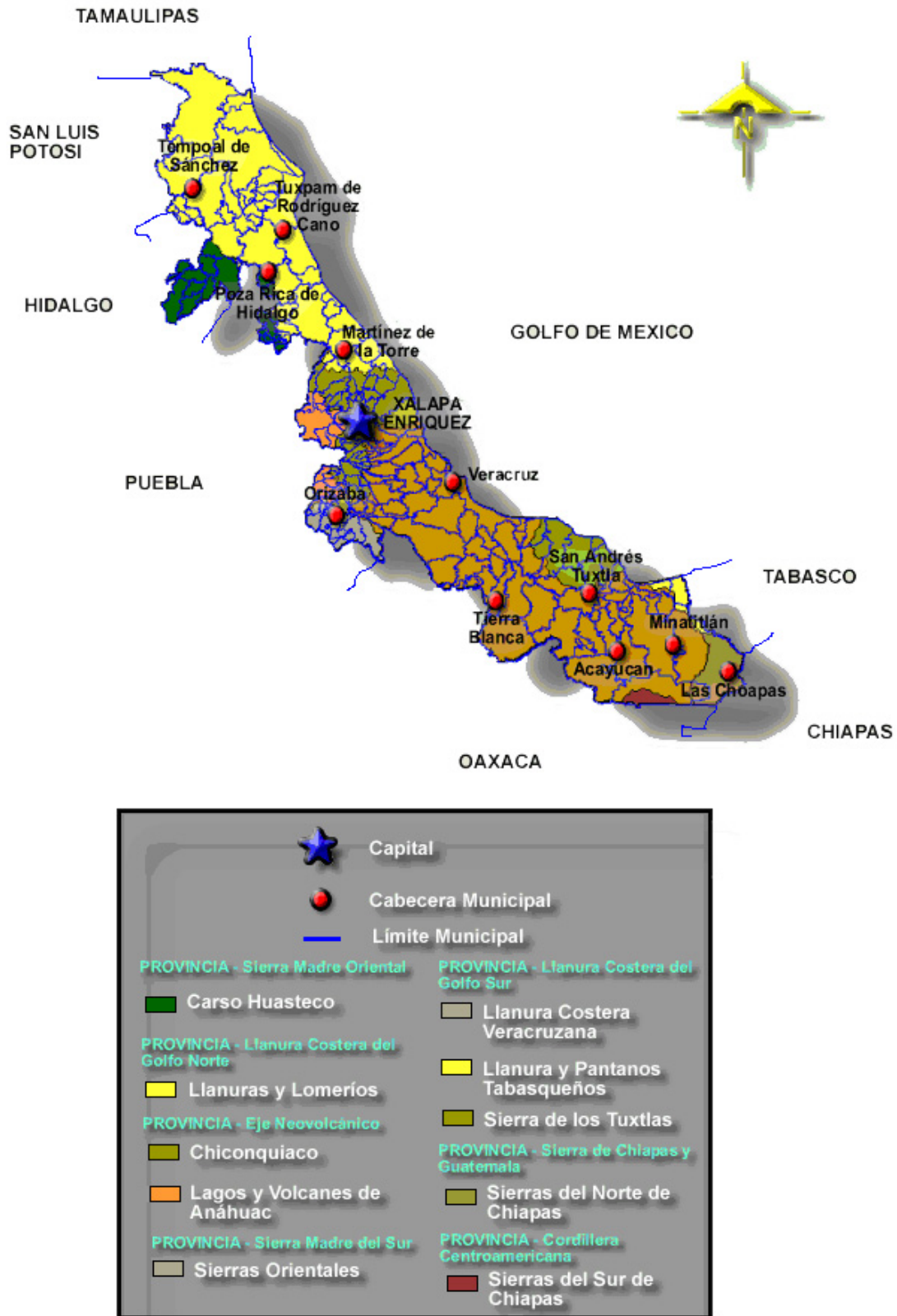


Figura 5.15 Mapa de las elevaciones principales en el estado de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006.

5.3.3 Orografía

La superficie del territorio veracruzano no es totalmente plana. Se encuentran zonas bajas y altas; llanos, lomas, cañadas, montañas y barrancas. Estas desigualdades constituyen las formas del relieve del estado. En la tabla 5.4 y en la figura 5.16 se presentan las principales elevaciones del estado, así como su ubicación geográfica.

A lo largo de la costa del Golfo de México se localizan grandes superficies casi planas: las llanuras costeras. De las llanuras costeras pasamos a los lomeríos y cañadas. La Sierra Madre Oriental recorre al estado de Veracruz de norte a sur, con derivaciones hacia la costa que forma la Sierra de los Tuxtlas. La Sierra Madre Oriental, que recibe nombres diferentes según el lugar donde se localice: Sierra de Huayacocotla, Zomelahuacan, Chiconquiaco, Huatusco y Zongolica. Al norte se localiza la Sierra de Otontepec o Tantima y al sur la de Los Tuxtlas, que no están unidas a la Sierra Madre Oriental.

Como depresión orográfica importante, destaca la llanura del Sotavento al sur. En la región central sobresalen dos elevadas prominencias montañosas: el Pico de Orizaba, que con 5 610 msnm es la máxima cima geológica del país, y el Cofre de Perote, con 4 200 msnm. Ambas se integran al eje neovolcánico de México. Al norte, se alzan las regiones serranas de Huayacocotla y Chiconquiaco y se forma la llanura de la Huasteca Veracruzana, y en la parte media del estado se localiza la serranía de Zongolica (Universidad Veracruzana, 2006). Otras elevaciones importantes, cerro Tepozteca con una altura de 3 140 msnm, el cerro Cuamila con una altura de 2 980 msnm, y el volcán San Martín Tuxtla con una altura de 1 680 msnm.

Tabla 5.4 Principales elevaciones del estado de Veracruz.

NOMBRE	LATITUD NORTE		LONGITUD OESTE		ALTITUD (msnm)
	GRADOS	MINUTOS	GRADOS	MINUTOS	
Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)	19	02	97	16	5610
Volcán Cofre de Perote	19	29	97	09	4200
Cerro Tepozteca	18	55	97	10	3140
Cerro Cuamila	19	27	97	16	2980
Volcán San Martín Tuxtla	18	33	95	12	1680
Sierra de Santa Martha	18	23	94	52	1500
Cerro San Martín Pajapan	18	19	94	44	1160
Sierra Otontepec	21	16	97	52	1160
Sierra La Garganta	17	13	94	19	860

Nota: las siglas msnm denota metros sobre el nivel del mar.

Fuente: INEGI. Carta topográfica, escala 1:50 000.

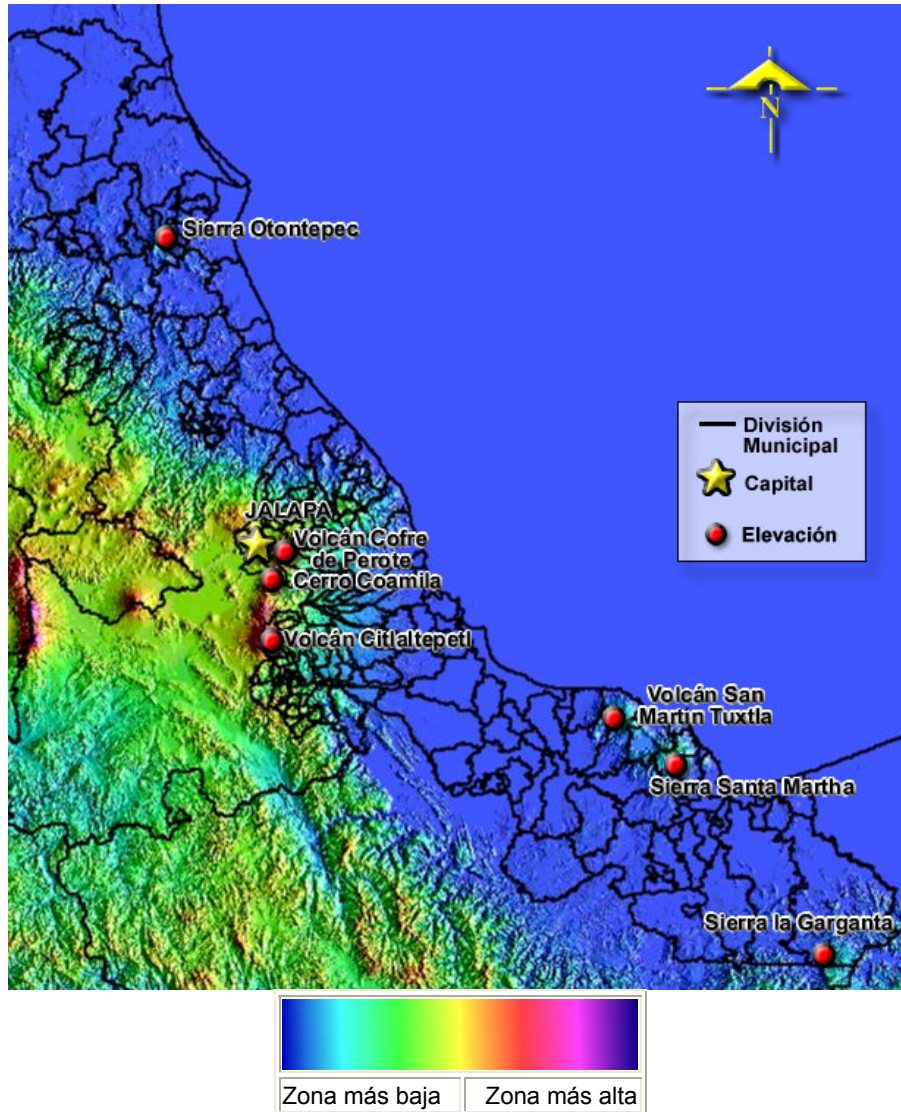


Figura 5.16 Mapa de las elevaciones principales en el estado de Veracruz.
Fuente: INEGI, 2006a.

5.3.4 Suelo

La composición de los suelos en el estado de Veracruz es variada. En la Cuenca del Pánuco se localizan los del tipo rendzina; en la planicie costera, los de estepa o pradera; en las zonas serranas, los podzoles; en la parte media de la entidad, los de migajón rojo y amarillo del grupo laterítico, y en la región sur, los suelos gley. (Universidad Veracruzana, 2006)

En la tabla 5.5 se presentan los principales tipos de suelo presentes en el estado y el porcentaje de la superficie estatal que abarcan, en la figura 5.17 se indica la distribución espacial de los diferentes tipos de suelo en Veracruz.

Tabla 5.5 Tipos de suelo presentes en el estado de Veracruz.

UNIDAD		SUBUNIDAD		CLASE TEXTURAL		% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
CLAVE	NOMBRE	CLAVE	NOMBRE	CLAVE	NOMBRE	
A	ACRISOL	h	Húmico	2,3	Media, fina	2,34
		o	Órtico	2,3	Media, fina	6,22
		p	Plíntico	1,2	Gruesa, media	0,46
B	CAMBISOL	K	Cálcico	1,2,3	Gruesa, media, fina	1,71
		c	Crómico	1	Gruesa	0,20
		e	Éutrico	2	Media	0,60
		f	Ferrálico	1,2	Gruesa, media	1,39
		g	Gléyico	2	Media	0,38
		v	Vértico	2,3	Media, fina	3,16
		E	RENDZINA	NA	NA	2,3
G	GLEYSOL	e	Éutrico	1,2,3	Gruesa, media, fina	0,67
		m	Mólico	2	Media	0,68
		v	Vértico	3	Fina	6,37
H	FEOZEM	c	Calcárico	2,3	Media, fina	1,77
		h	Háplico	1,2,3	Gruesa, media, fina	8,20
		l	Lúvico	2,3	Media, fina	2,65
I	LITOSOL	NA	NA	1,2,3	Gruesa, media, fina	1,31
K	CASTAÑOZEM	k	Cálcico	2	Media	0,17
L	LUVISOL	c	Crómico	2,3	Media, fina	1,74
		f	Férrico	3	Fina	0,84
		g	Gléyico	2,3	Media, fina	0,30
		o	Órtico	2,3	Media, fina	6,85
		p	Plíntico	2,3	Media, fina	0,96
N	NITOSOL	d	Dístrico	3	Fina	0,77
Q	ARENOSOL	c	Cámbico	1	Gruesa	1,96
R	REGOSOL	c	Calcárico	1,2,3	Gruesa, media, fina	6,90
		d	Dístrico	3	Fina	0,85
		e	Éutrico	1,2,3	Gruesa, media, fina	1,99
T	ANDOSOL	h	Húmico	1,2	Gruesa, media	5,17
		m	Mólico	1,2	Gruesa, media	0,31
		o	Órtico	2	Media	1,15
V	VERTISOL	c	Crómico	3	Fina	2,61
		p	Pélico	3	Fina	25,58
Z	SOLONCHAK	g	Gléyico	3	Fina	0,29
OTRO						1,88

Fuente: INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta edafológica, escala 1:250 000.

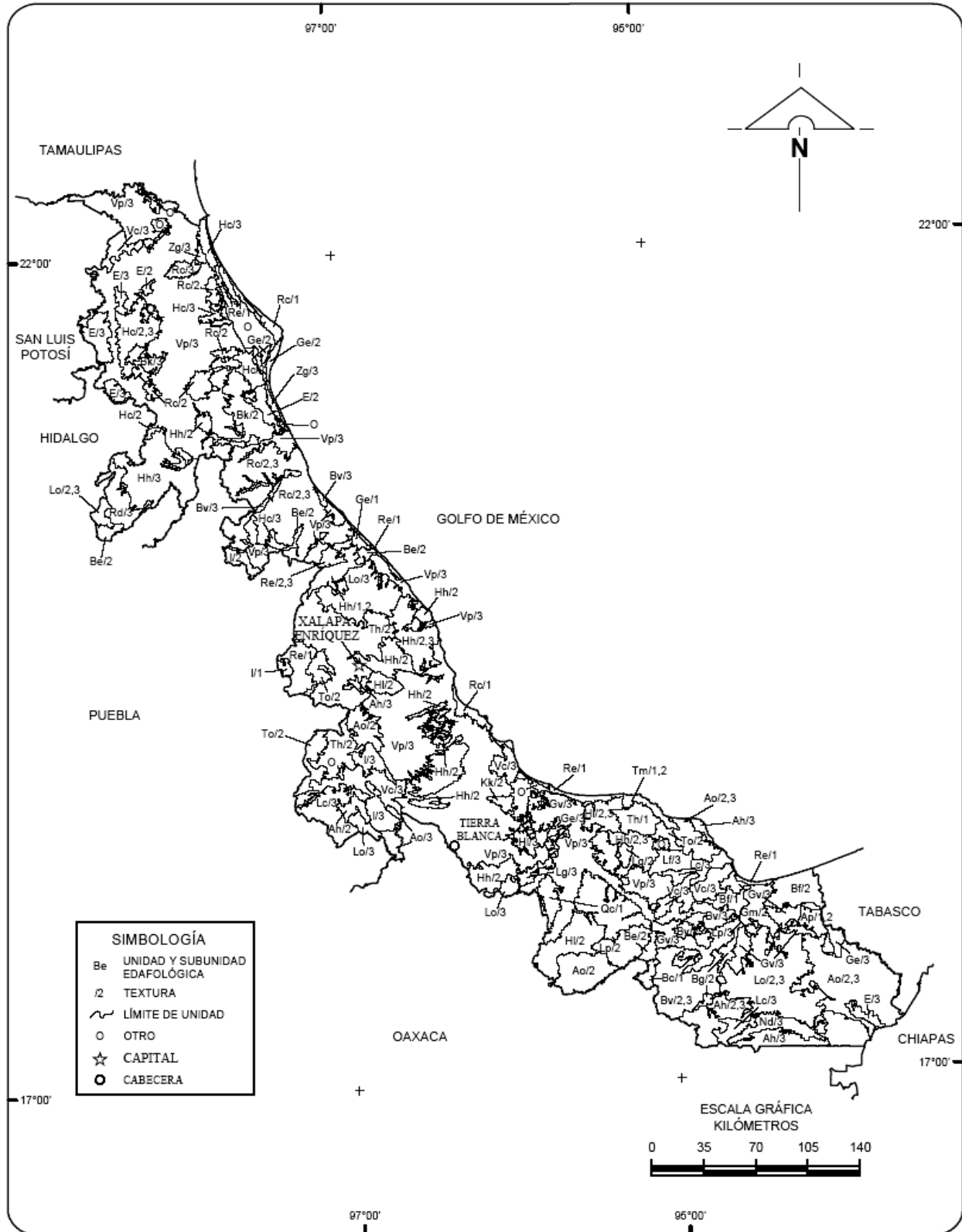


Figura 5.17 Distribución espacial de los tipos de suelo en el estado de Veracruz.

Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

Uso potencial del suelo.

Posibilidades de Uso Agrícola.

Cerca del 50% de la superficie de Veracruz presenta características favorables para realizar agricultura mecanizada continua, con diferentes grados de aptitud. Estas tierras se distribuyen tanto en el norte como en el centro y sur de la entidad. La zona norte se extiende desde los límites con Tamaulipas, San Luis Potosí e Hidalgo, hasta los alrededores de Tempoal de Sánchez. La zona centro se localiza al sur de Tempoal de Sánchez y se va estrechando paulatinamente hasta la barra de Nautla. La zona sur comprende de la ciudad de Veracruz a las inmediaciones del río Coatzacoalcos. Ver figura 5.18. (INEGI, 2006a)

Posibilidades de Uso Forestal.

El estado de Veracruz cuenta aún con grandes superficies arboladas, cubiertas principalmente por selvas y en menor escala por bosques de coníferas y latifoliadas. Pero el recurso ha sido mermado considerablemente debido a la deforestación intensa que ha sufrido al extraerse maderas preciosas, al ser eliminada la vegetación natural para incorporar los terrenos a las actividades agropecuarias y al asentarse de manera irregular la población. Sin embargo, aún es posible realizar la explotación forestal en diversas áreas, la cual debe estar apegada a las técnicas de manejo y conservación adecuadas. Ver figura 5.18. (*Op. Cit.*)

Posibilidades de Uso Pecuario.

Alrededor del 90% del territorio veracruzano presenta posibilidades para el desarrollo de actividades ganaderas, tanto en forma intensiva como extensiva. Pero el establecimiento de praderas cultivadas presenta diferentes niveles de aptitud debido a los factores físicos que caracterizan a los terrenos. Entre estos factores destacan la topografía y la inundación. La explotación ganadera con bovinos, en forma extensiva, mediante el aprovechamiento de agostaderos diferentes al pastizal, se puede efectuar, en general, en terrenos de lomeríos y estribaciones de las sierras, que abarcan cerca del 35% del territorio estatal. Ver figura 5.19. (*Op. Cit.*)



Figura 5.18 Mapa de uso potencial agrícola del suelo en el estado de Veracruz.
Fuente: INEGI, 2006a.

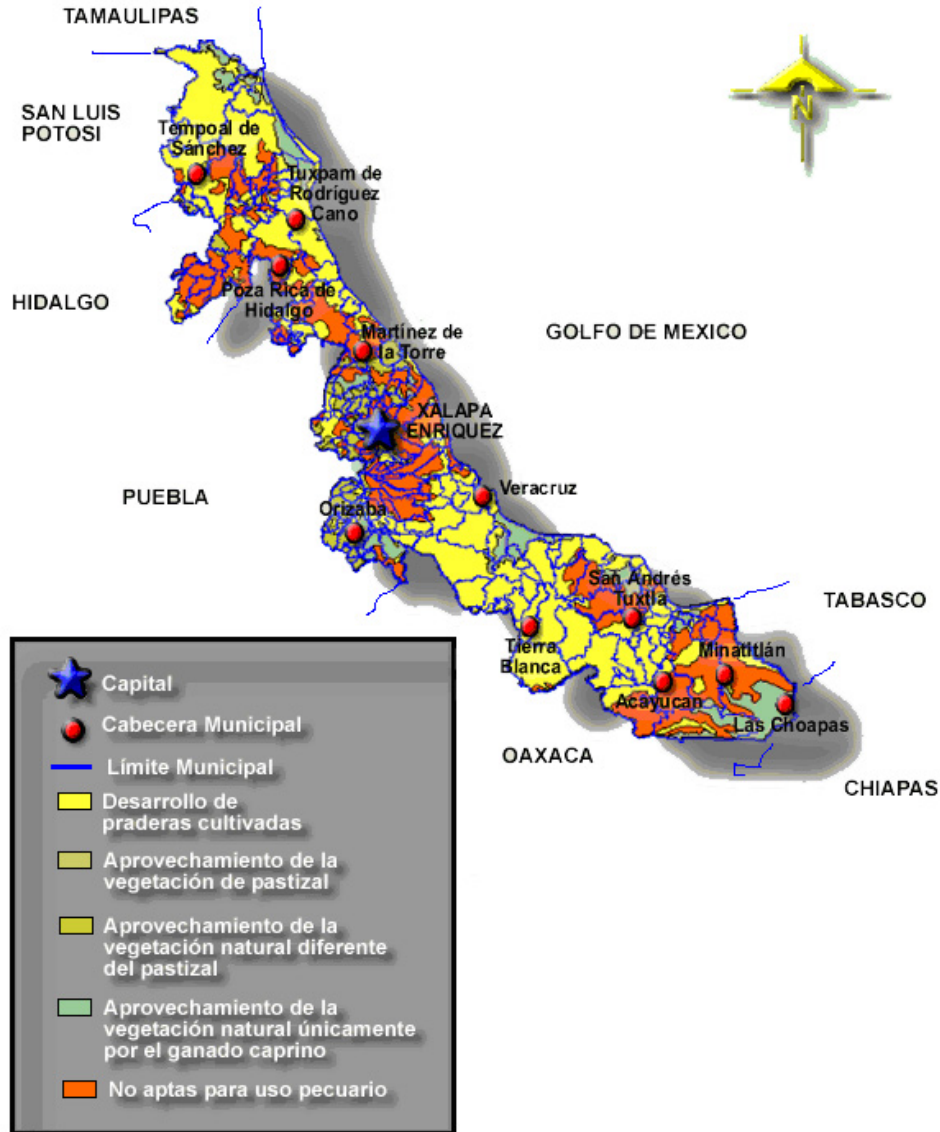


Figura 5.19 Mapa de uso potencial pecuario del suelo en el estado de Veracruz.
Fuente: INEGI, 2006a.

5.3.5 Características geológicas

El estado de Veracruz está comprendido dentro de siete provincias geológicas, que son:

- Llanura Costera del Golfo Norte.
- Sierra Madre Oriental.
- Eje Neovolcánico.
- Sierra Madre del Sur.
- Cordillera Centroamericana.
- Sierra de Chiapas.
- Sierra de Guatemala.

Cada una de ellas con características litológicas, estructurales y geomorfológicas propias y definidas, las cuales a continuación se describen brevemente.

■ Provincia Llanura Costera del Golfo Norte.

Comprende gran parte del norte del estado, desde el límite con Tamaulipas hasta el sur de Papantla, donde se localizan las elevaciones del Eje Neovolcánico; su límite occidental lo constituye la Sierra Madre Oriental y hacia el oriente el Golfo de México. Los afloramientos más extensos corresponden a rocas sedimentarias detríticas del Terciario, depositadas en la Cuenca Tampico - Misantla. Las rocas más antiguas en esta región son las del Cretácico Superior, en tanto que las más recientes son depósitos de suelos, formados por materiales detríticos derivados de las rocas preexistentes. (INEGI, 2006a)

Estratigrafía.

En esta provincia existe una gran diversidad de rocas representativas de los diferentes periodos geológicos, específicamente del Cretácico Superior, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno, así como rocas volcánicas. (*Op. Cit.*)

■ Provincia Sierra Madre Oriental.

Comprende parte de la zona occidental del estado, está constituida por una cadena montañosa plegada. La forman potentes espesores de rocas sedimentarias, tanto marinas como continentales. (INEGI, 2006)

Estratigrafía.

Las rocas más antiguas de la provincia, dentro de Veracruz, están representadas por lutitas y areniscas del Pérmico. También hay rocas representativas del Triásico, Jurásico Inferior, Cretácico Inferior, Cretácico Superior y del Mesozoico. (*Op. Cit.*)

■ Provincia Eje Neovolcánico.

Esta provincia atraviesa el estado aproximadamente en su porción central, y se extiende desde el sur de Papantla de Olarte hasta el norte de Córdoba. (*Op. Cit.*)

Estratigrafía.

Esta provincia está constituida principalmente por rocas ígneas de composición andesítica, riolítica y basáltica, que se depositaron durante el Cenozoico Superior en forma de derrames, tobas, brechas y cenizas volcánicas. Las rocas más antiguas que afloran en esta porción corresponden a depósitos calcáreo - arcillosos del Jurásico Superior, las más jóvenes a depósitos no consolidados del Cuaternario. (*Op. Cit.*)

■ Provincia Sierra Madre del Sur.

Comprende la porción limítrofe con el estado de Puebla, en el área de Orizaba, está formada por montañas plegadas que siguen una orientación noroeste - sureste. (*Op. Cit.*)

Estratigrafía.

Del Cretácico Inferior aflora una secuencia de calizas negras que contienen lentes y bandas de pedernal. El Cretácico Superior está representado por la unidad de calizas de color gris claro y negro depositadas en mares profundos. En los valles de Orizaba y Córdoba se han depositado potentes espesores de suelos aluviales del Cuaternario provenientes de la erosión de rocas volcánicas y calcáreas. (*Op. Cit.*)

■ Provincia Llanura Costera del Golfo Sur.

Ocupa casi toda la porción sur de la entidad. Se extiende en forma de franja más o menos paralela al Golfo de México, desde el norte de la ciudad de Veracruz hasta el río Tonalá, de donde continúa por territorio tabasqueño. (*Op. Cit.*)

Estratigrafía.

Las rocas que afloran en la provincia cubren un lapso geocronológico que va del Jurásico Superior al Cuaternario (Reciente). Esta provincia está constituida en su mayor parte por depósitos recientes

formados de suelos que cubren gran parte de la secuencia sedimentaria depositada en cuencas marinas del Terciario. Los afloramientos de rocas volcánicas se distribuyen en el área de Los Tuxtlas, donde su expresión morfológica de volcanes y prominencias topográficas contrastan con la llanura costera. (INEGI, 2006)

✚ **Provincia Cordillera Centroamericana.**

Abarca una pequeña zona del sur del estado. Forma una cadena de montañas constituida por un núcleo de rocas cristalinas sobre el cual descansa la secuencia de rocas sedimentarias del Mesozoico. (Op. Cit.)

Estratigrafía.

Las rocas que están expuestas a la superficie, cubren un rango geocronológico que va del Paleozoico hasta el Cretácico Inferior. Las rocas intrusivas ácidas (granito y granodioritas) son las más antiguas y las que constituyen el basamento; su morfología es de sierras altas y escarpadas. Afloran hacia el sur de Minatitlán, en los límites con el estado de Oaxaca. (Op. Cit.)

✚ **Provincia Sierras de Chiapas y Guatemala.**

Comprende una parte del sureste del estado de Veracruz. Está constituida por rocas sedimentarias principalmente del Mesozoico, aunque también existen depósitos del Cenozoico. La unidad litológica más antigua que aflora en esta porción de la provincia es del Triásico, y la más reciente es del Oligoceno. (Op. Cit.)

En la tabla 5.6 y en la figura 5.20 se indican los principales rasgos geológicos de este estado, en la figura 5.21 se presenta el mapa geológico del estado de Veracruz.

Tabla 5.6 Geología del estado de Veracruz.

ERA		PERIODO		ROCA O SUELO		% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
CLAVE	NOMBRE	CLAVE	NOMBRE	CLAVE	NOMBRE	
C	CENOZOICO	Q	CUATERNARIO	(le)	Ígnea extrusiva	4,90
				(S)	Sedimentaria	4,19
				(Su)	Suelo	23,21
M	MESOZOICO	T	TERCIARIO	(le)	Ígnea extrusiva	11,11
				(S)	Sedimentaria	45,95
P	PALEOZOICO	K	CRETÁCICO	(S)	Sedimentaria	8,18
				J	JURÁSICO	(S)
P	PALEOZOICO	P	PALEOZOICO	(li)	Ígnea intrusiva	0,07
OTRO						1,81

Fuente: INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta geológica, escala 1:250 000.

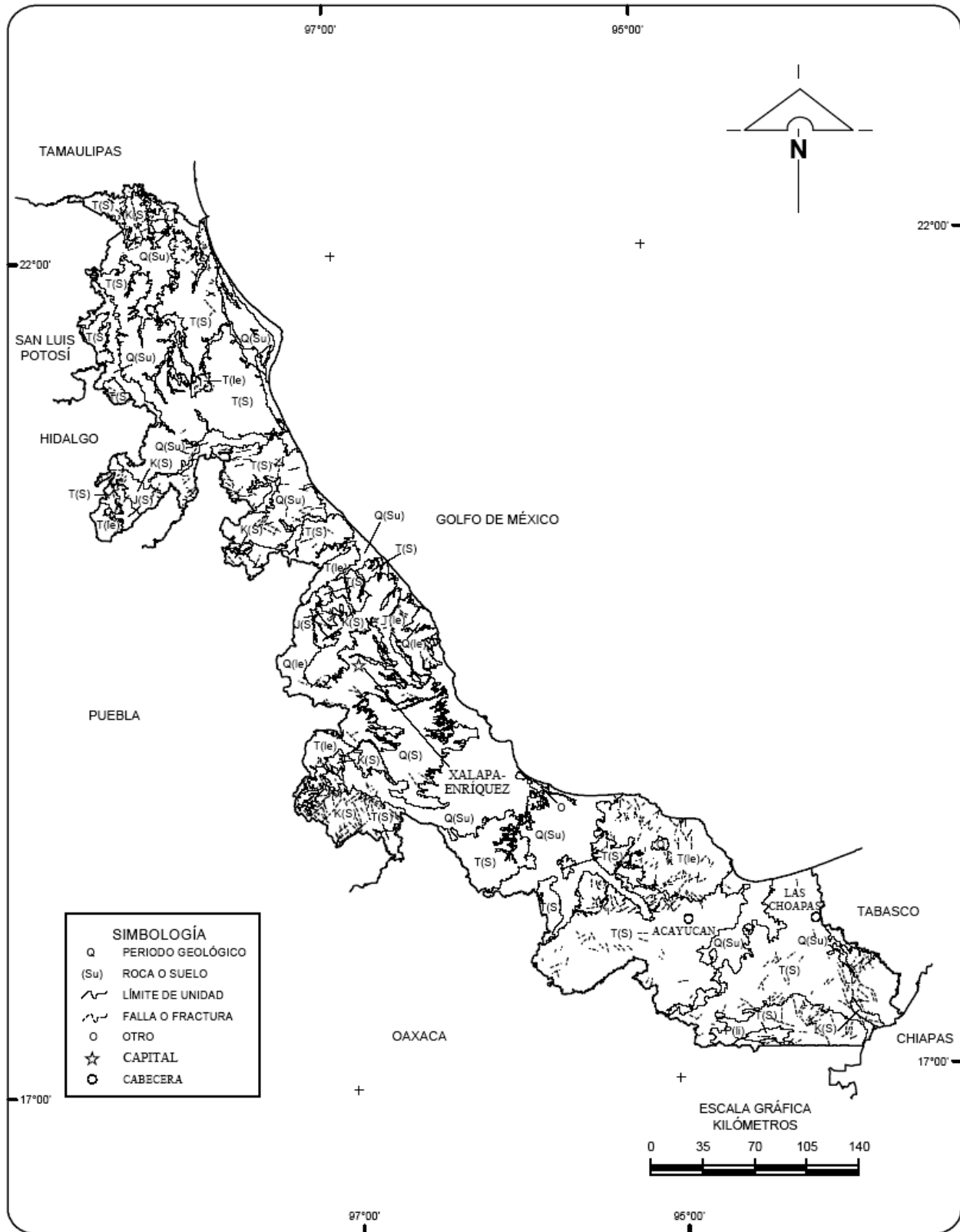


Figura 5.20 Características geológicas del estado de Veracruz.
Fuente: INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta geológica, escala 1:250 000.

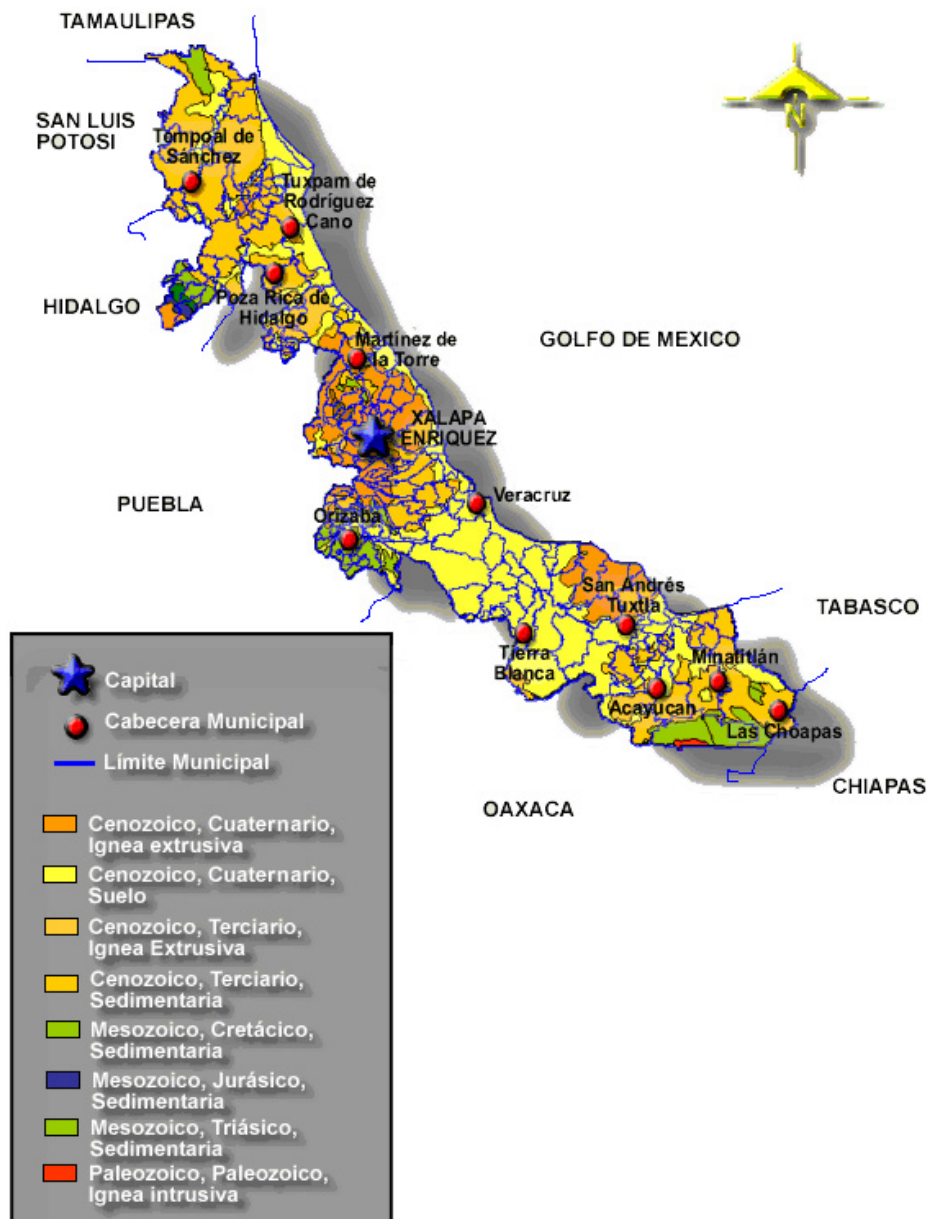


Figura 5.21 Mapa geológico del estado de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006a.

5.3.6 Hidrología

Veracruz concentra el 35% de los recursos hidrológicos del país, ya que todos los ríos veracruzanos pertenecen a la vertiente del Golfo de México (INEGI, 2006a). Sus principales ríos, por su profundidad y caudal, presentan condiciones adecuadas para la navegación, y son aptos para satisfacer con holgura, las necesidades de la agricultura, de la ganadería y de la industria. Las mayores cuencas hidrológicas, son alimentadas por los ríos Coatzacoalcos, Papaloapan, La Antigua, Tuxpan y Pánuco. En este último río se encuentra la presa de Chicayán, la más importante del estado, y que fue construida para el control de avenidas y para el riego. Los ríos más importantes son Balsas, Pánuco, Tuxpan - Nautla y Cazones, en el norte; Tecolutla, Actopan, La Antigua, Jamapa, Nautla y Blanco, en el centro; y Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva - Usumacinta, en el sur.

El litoral y la franja marítima del estado, comprende 684 km de costa y 253 000 km² de mar territorial. Su escurrimiento fluvial y sus recursos acuíferos se complementan con 116 000 hectáreas de aguas interiores en lagunas, esteros, presas y otros depósitos naturales y artificiales (INEGI, 2006a). Entre las primeras destacan, por su dimensión, las de Tamiahua, Alvarado, Zontecomapan y Ostión. Respecto a las lagunas interiores, se localizan, en el norte, las de Pueblo Viejo, Tamós y Tortugas.

En las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 se presentan, respectivamente, las regiones y cuencas hidrológicas, las principales corrientes de agua, y los cuerpos de aguas del estado de Veracruz. En la figura 5.22 se presenta un mapa de las regiones hidrológicas de Veracruz, en la figura 5.23 se muestran los ríos y cuerpos de agua con que cuenta este Estado, mientras que en la figura 5.24 se muestran los principales ríos de Veracruz. Debe hacerse notar que desde 1976 opera en diversos lugares de Veracruz la veda elástica o parcial para la explotación de las aguas del subsuelo, tal es el caso de las zonas de Alvarado, Oriental, Cuenca del Río Guayalejo, Minatitlán y Pueblo Viejo.

Tabla 5.7 Regiones y cuencas hidrológicas del estado de Veracruz.

CLAVE	REGIÓN	CUENCA	% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
RH18	Balsas	R. Atoyac	0,87
RH26	Pánuco	R. Pánuco	8,49
		R. Tamesí	1,41
		R. Moctezuma	4,60
RH27	Tuxpan-Nautla	R. Nautla y Otros	6,65
		R. Tecolutla	2,49
		R. Cazonas	3,35
		R. Tuxpan	8,31
		R. Tamiahua	3,39
RH28	Papaloapan	R. Papaloapan	27,26
		R. Jamapa y Otros	13,22
RH29	Coatzacoalcos	R. Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona	3,41
		R. Coatzacoalcos	16,48
RH30	Grijalva - Usumacinta	R. Grijalva-Tuxtla Gutiérrez	0,07

Fuente: INEGI. Carta hidrológica de aguas superficiales, escala 1:1 000 000 y escala 1:250 000.

Tabla 5.8 Corrientes de agua del estado de Veracruz.

NOMBRE	UBICACIÓN	NOMBRE	UBICACIÓN
Tamesí	R. Tamesí	Paso de Ovejas	R. Jamapa y Otros
Pánuco	R. Pánuco	Hueyapan	R. Papaloapan
Chicayán	R. Pánuco	San Juan	R. Papaloapan
Tamacuil	R. Pánuco	Coatzacoalcos	R. Coatzacoalcos
Tempoal	R. Moctezuma	Uxpanapa	R. Coatzacoalcos
Bobos-Nautla	R. Nautla y otros	Tonalá	R. Tonalá y lagunas del Carmen y Machona
Diamante	R. Nautla y otros	Cazonas	R. Cazonas
Papaloapan	R. Papaloapan	Tecolutla	R. Tecolutla
Tuxpan	R. Tuxpan	Necaxa	R. Tecolutla
Atoyac	R. Jamapa y otros	Actopan	R. Jamapa y otros
Jamapa	R. Jamapa y otros	San Marcos	R. Cazonas
Muerto	R. Papaloapan	Los Pescados	R. Jamapa y otros

Fuente: INEGI. Carta hidrológica de aguas superficiales, escala 1:1 000 000. INEGI. Carta topográfica, escala 1:50 000.

Tabla 5.9 Cuerpos de agua del estado de Veracruz.

NOMBRE	UBICACIÓN	NOMBRE	UBICACIÓN
P. Paso de Piedras (Chicayán)	R. Pánuco	L. Pueblo Viejo	R. Pánuco
P. Canseco	R. Papaloapan	L. Chairel	R. Tamesí
P. La Cangrejera	R. Coatzacoalcos	L. Grande	R. Nautla y otros
P. Insurgente José Evaristo Molina (Tiradores)	R. Jamapa y otros	L. Tampamachoco	R. Tamiahua
P. Tuxpango	R. Papaloapan	L. de Tames (Chila)	R. Pánuco
P. El Encanto	R. Nautla y otros	L. Ostión	R. Coatzacoalcos
L. Tamiahua	R. Tamiahua	L. Mezcalapa	R. Coatzacoalcos
L. de Alvarado	R. Papaloapan	L. Mandinga	R. Jamapa y otros
L. Catemaco	R. Papaloapan	L. Pajarillos	R. Papaloapan
L. María Lisamba	R. Papaloapan	L. Sontecomapan	R. Papaloapan
L. La Tortuga	R. Tamesí		

Fuente: INEGI. Carta hidrológica de aguas superficiales, escala 1:1 000 000. INEGI. Carta topográfica, escala 1:50 000.

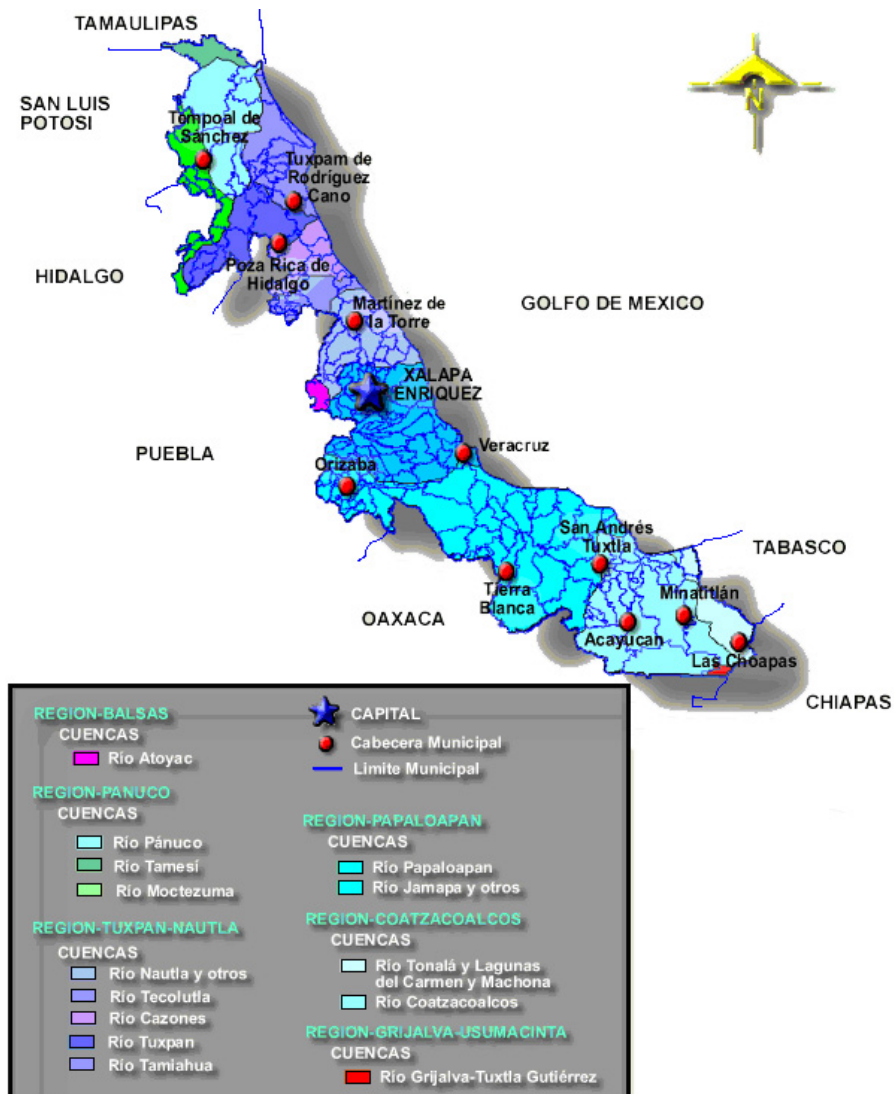


Figura 5.22 Mapa de regiones hidrológicas de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006a.

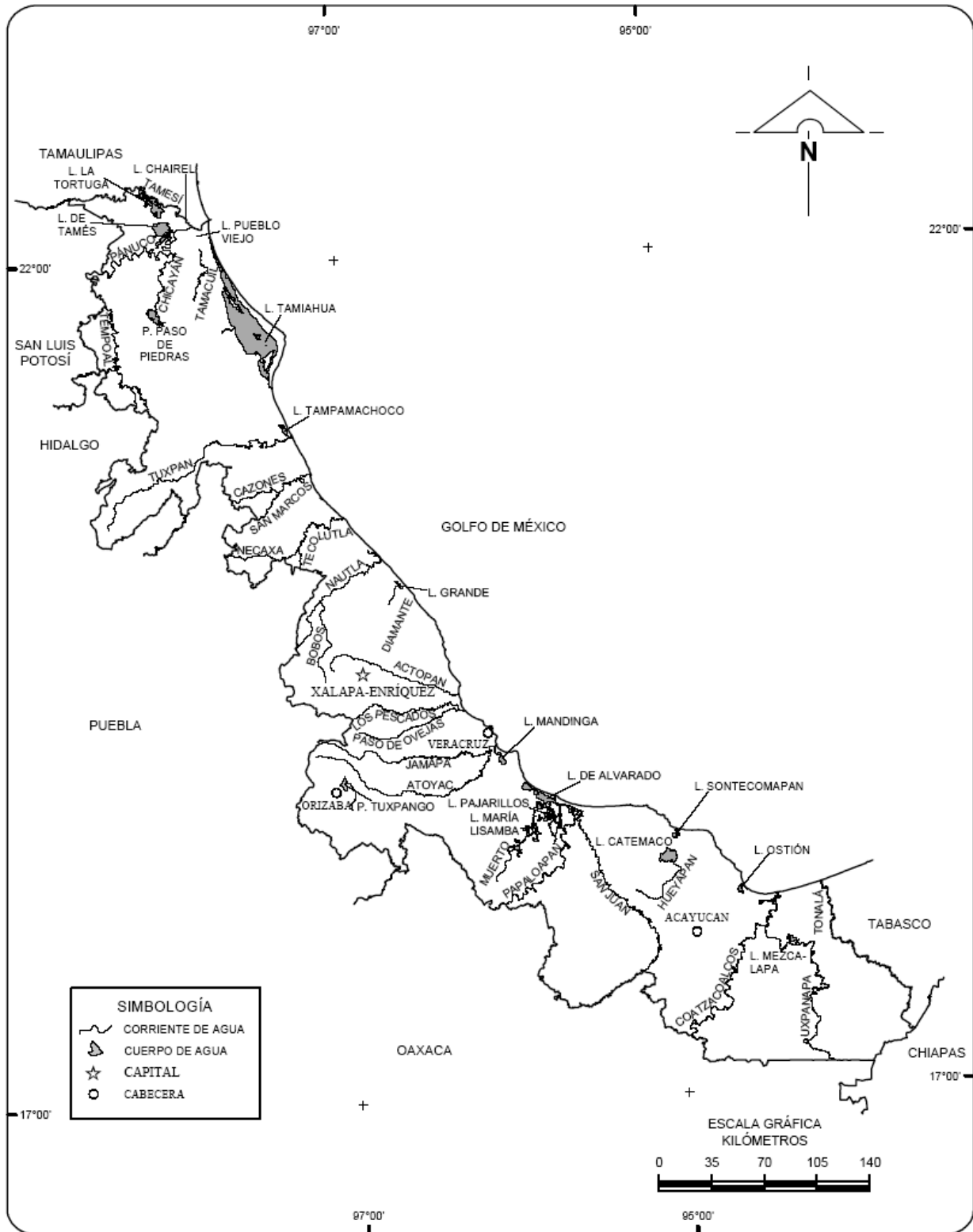


Figura 5.23 Corrientes y cuerpos de agua del estado de Veracruz.
Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

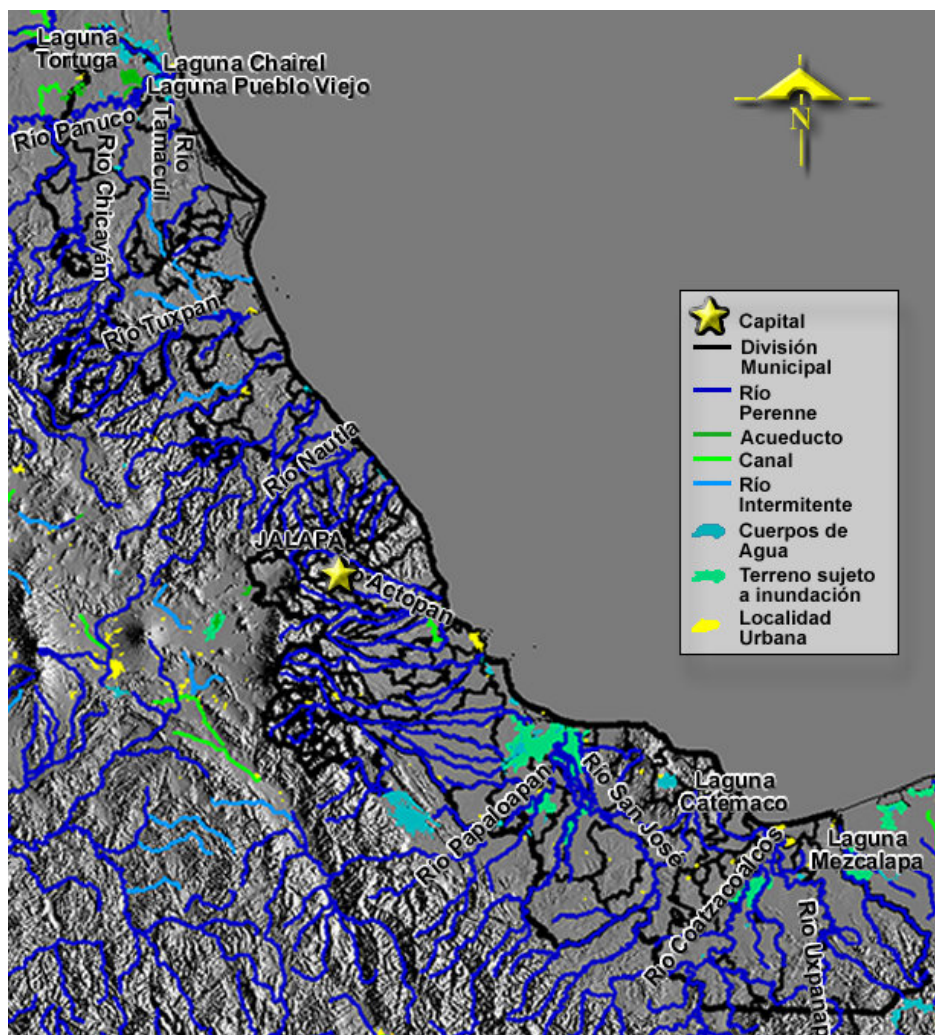


Figura 5.24 Principales ríos de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006a.

5.3.7 Climatología

Por su variada composición geográfica y por su posición frente al Golfo de México, en Veracruz existe una gran diversidad de climas. En la llanura costera y hasta la base de la Sierra Madre Oriental, el clima es cálido húmedo, con temperaturas promedio de 25 °C y precipitación media anual de 1 500 mm. En el sureste, el clima es cálido con lluvias todo el año; la precipitación media anual se estima en 2 500 mm y la temperatura promedio es de 24 °C. En los declives medios de la sierra, se observan condiciones templadas y húmedas. Finalmente, en las alturas de los principales volcanes, el clima es frío. (Universidad Veracruzana, 2006)

El estado de Veracruz se localiza en la franja intertropical, pero cuenta con una gran diversidad de climas debido a que su territorio posee varias diferencias de altitud, las cuales abarcan desde el nivel del mar hasta la altura máxima del país: 5 700 msnm que corresponde al volcán Pico de Orizaba. Si bien por su ubicación geográfica cuenta con características tropicales, la influencia de sus serranías las modifican, sobre todo en el centro oeste, lo cual da como resultado que los climas se distribuyan paralelos a la costa de la siguiente manera: cálidos, semicálidos, templados, fríos y semisecos. Al hablar del clima de Veracruz es necesario hacer mención de dos fenómenos meteorológicos de relevancia que hacen sentir su influencia en el mismo: (Veracruz, 2001)

- Los primeros son los ciclones, que se presentan principalmente en otoño, aunque los hay también en verano. Su presencia después de la temporada lluviosa, en verano, hace que ésta se prolongue, causando eventuales inundaciones, ya que los ríos se desbordan.
- Los segundos son los frentes fríos o “nortes”, como se les conoce comúnmente, que son frecuentes en invierno y algunas veces se prolongan hasta la primavera. Se trata de masas de aire frío, provenientes de las regiones polares, que al ponerse en contacto con las cálidas del Golfo de México las elevan, formando así nubes que se precipitan de manera tempestuosa.

En la tabla 5.10 se indica el tipo de clima y el porcentaje que ocupa de la superficie estatal. En la figura 5.25 se indica la distribución espacial de los diferentes tipos de climas de acuerdo a la información de la tabla 5.10, y en la figura 5.26 se muestran las isotermas presentes en el estado de Veracruz.

Tabla 5.10 Climas presentes en el estado de Veracruz.

TIPO O SUBTIPO	SÍMBOLO	% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
Cálido húmedo con lluvias todo el año	Af	5,08
Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano	Am	26,46
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	A(w)	54,05
Semicálido húmedo con lluvias todo el año	ACf	5,74
Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano	ACm	2,97
Templado húmedo con lluvias todo el año	C(f)	1,44
Templado húmedo con abundantes lluvias en verano	C(m)	1,91
Templado subhúmedo con lluvias en verano	C(w)	1,38
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	C(E)(w)	0,52
Semiseco templado	BS1k	0,45

Fuente: INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta de climas, escala 1:1 000 000.

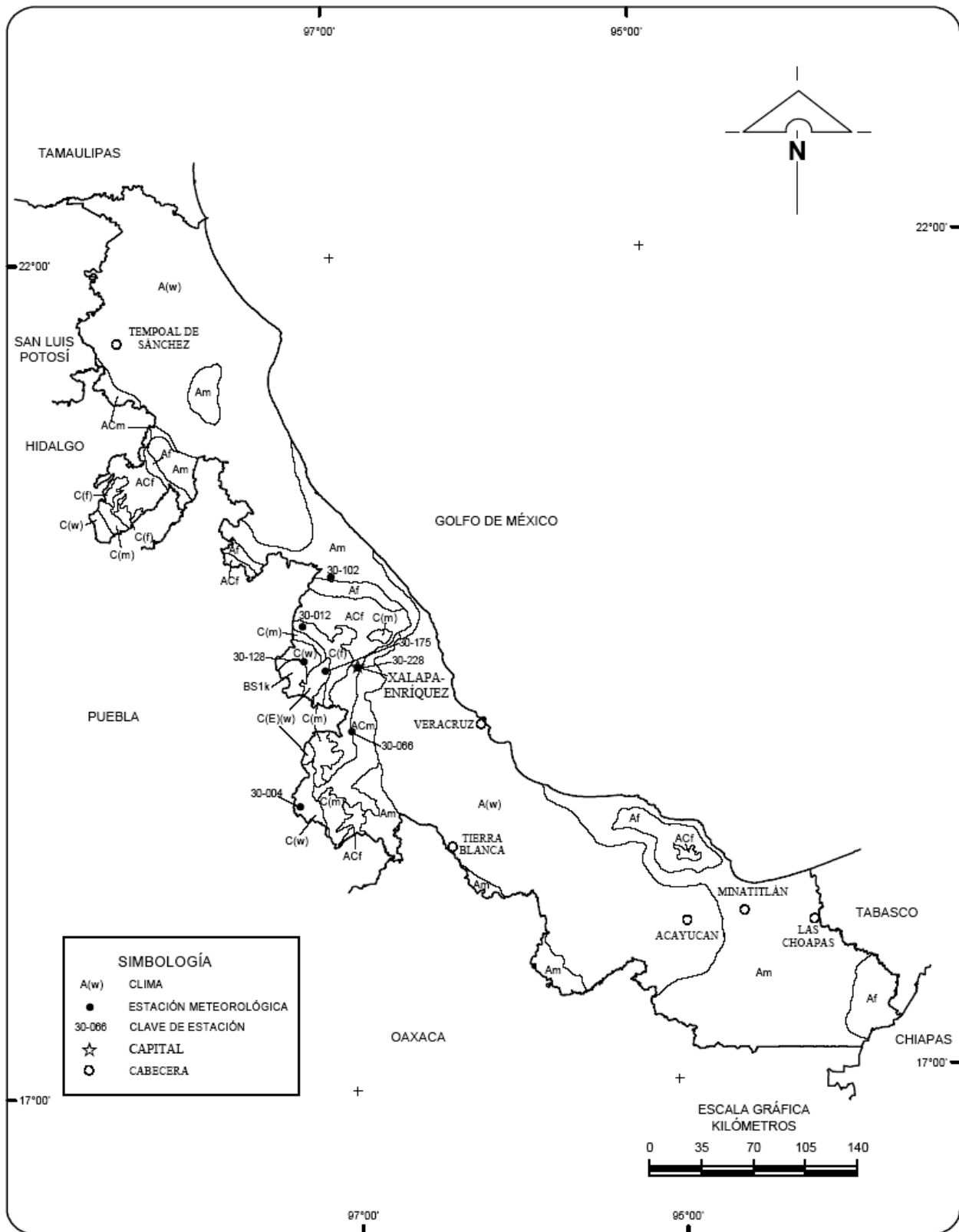


Figura 5.25 Distribución de los diversos climas en el estado de Veracruz.
Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

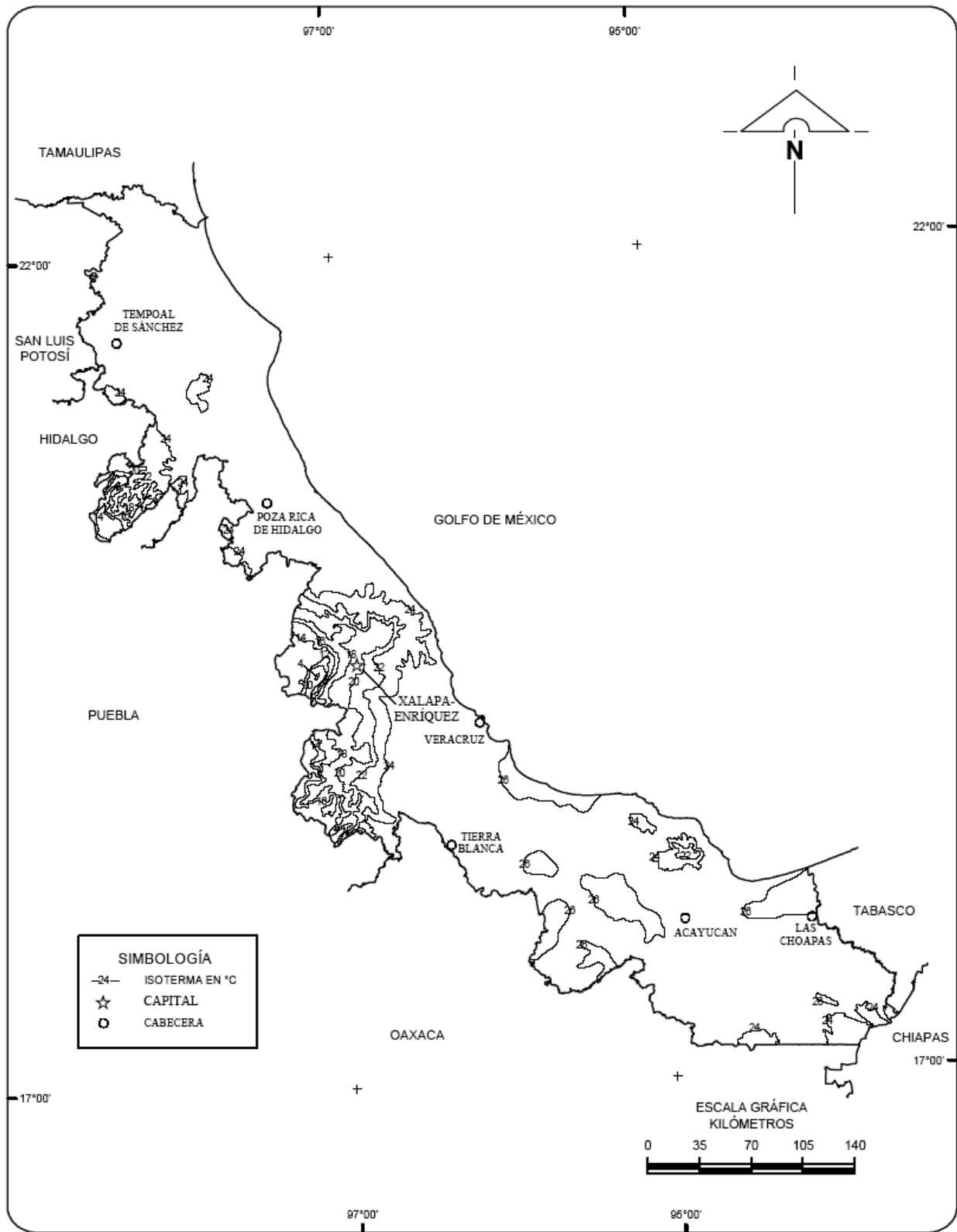


Figura 5.26 Isothermas del estado de Veracruz.
Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

Climas cálidos húmedos.

Aproximadamente el 80% del territorio veracruzano cuenta con clima cálido húmedo, lo cual comprende las llanuras costeras del Golfo Norte y el Golfo Sur, hasta una altitud máxima de 1 000 m. La temperatura media anual en estas regiones es de 22 °C, mientras que la más baja es de 18 °C en el mes más frío. En cuanto a lluvias, pueden ser abundantemente lluviosos durante todo el año, o sólo abundantemente lluviosos en verano. (Universidad Veracruzana, 2006)

Climas semicálidos húmedos.

A partir de una altitud de 1 000 m y hasta los 1 600 m, el clima imperante es el semicálido húmedo, el cual lo encontramos en las cimas de los volcanes tuxtlecos. La zona que cuenta con este clima comprende a las ciudades de Tlapacoyan, Xalapa y Orizaba, en donde la temperatura media varía entre 18 °C y 22 °C durante el año, con lluvias distribuidas a lo largo del año. (*Op. Cit.*)

Climas templados.

Las zonas ubicadas a una altitud de entre 1 600 y 2 800 m poseen climas templados, y difieren en el grado de humedad y en la intensidad y el régimen de lluvias en función de su distancia horizontal a las sierras, cuya influencia es muy importante. Este clima se encuentra en el área más occidental del estado y se caracteriza por una temperatura media anual que oscila entre 12 y 18 °C, con lluvia esencialmente en verano, la cual sólo en ocasiones es abundante. La precipitación total anual oscila entre 500 y 2 500 mm. (*Op. Cit.*)

Climas semifríos y fríos.

El clima semifrío húmedo, con lluvias en verano, se encuentra en altitudes de entre 2 800 y 3 800 msnm, en las que se ubican el Cofre del Perote y el Pico de Orizaba. Su temperatura media fluctúa entre 5 y 12 °C. Dentro de esta misma estructura volcánica, en regiones más elevadas, a partir de los 3 800 m, se puede encontrar el clima frío, que se caracteriza por su temperatura media anual de entre 2 y 5 °C, la cual no favorece en nada al crecimiento de la vegetación, pues su suelo está permanentemente congelado. La precipitación total anual fluctúa de 600 a 1 200 mm. (*Op. Cit.*)

Climas semisecos.

El obstáculo que forman las elevaciones del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental, las cuales no permiten la llegada de los vientos húmedos con igual intensidad, producen el fenómeno del clima semiseco templado, con lluvias en verano. Este clima se encuentra en la ciudad de Perote y al oeste de la huasteca, en donde la temperatura media anual es de 14 °C. La precipitación total anual varía entre 400 y 500 mm. (*Op. Cit.*)

En la tabla 5.11 se muestra la precipitación total anual del año más seco y del más lluvioso en cada una de las estaciones meteorológicas ubicadas en el estado de Veracruz, lo anterior puede apreciarse en las figuras 5.27 y 5.28, debe hacerse notar que, de manera extraordinaria, este estado de la República Mexicana ha sido azotado por varios huracanes en los últimos años, lo cual ha generado inundaciones en varias zonas de dicho estado. En la figura 5.29 se presentan las isoyetas para el estado de Veracruz.

Tabla 5.11 Precipitación total anual en el estado de Veracruz.

Estación	Periodo	Precipitación promedio (mm)	Precipitación del año más seco		Precipitación del año más lluvioso	
			Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
Acultzingo	1961-1978	573,8	1977	285,5	1970	728
Atzalán	1961-1999	1 866,9	1987	1 305,2	1981	2 676,2
Huatusco de Chicuellar	1961-2001	2 131,8	1971	1 475,5	1981	2 448,5
Xalapa	1920-1999	1 430	1945	1 076	1952	2 025
Martínez de la Torre	1961-2002	1 627,3	1970	1 220	1981	2 276,7
Perote	1967-2002	525,7	1987	275,4	1975	659
Tembladeras	1966-2002	1 623,7	1980	1 041,9	1981	2 428

Fuente: CNA. Registro mensual de precipitación pluvial en mm, citado en INEGI, 2006a; INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

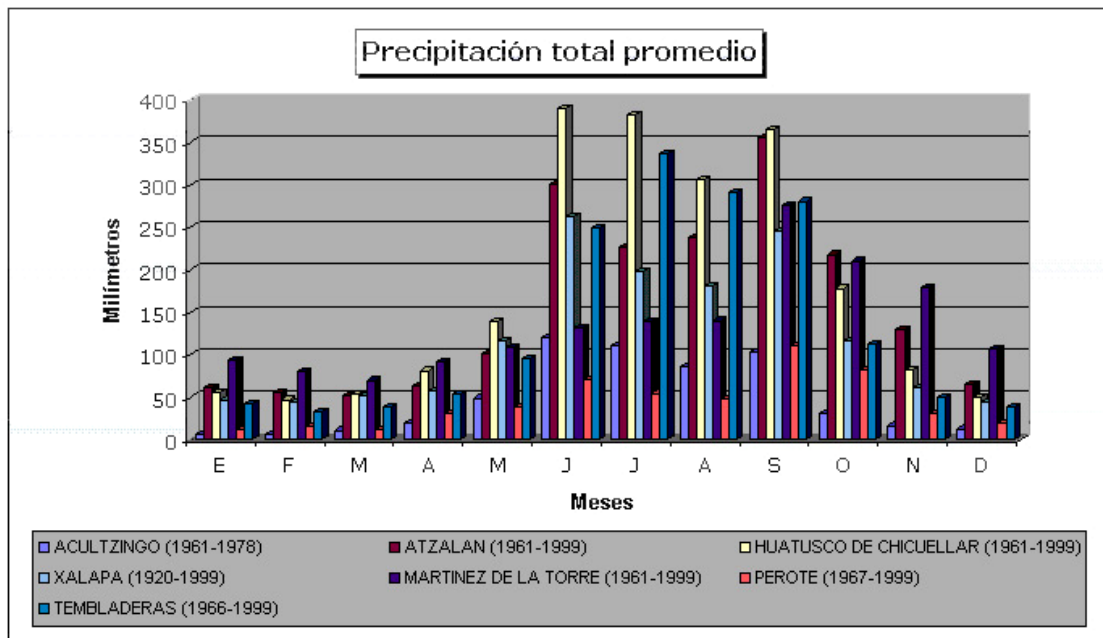


Figura 5.27 Distribución de la precipitación mensual en el estado de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006a.

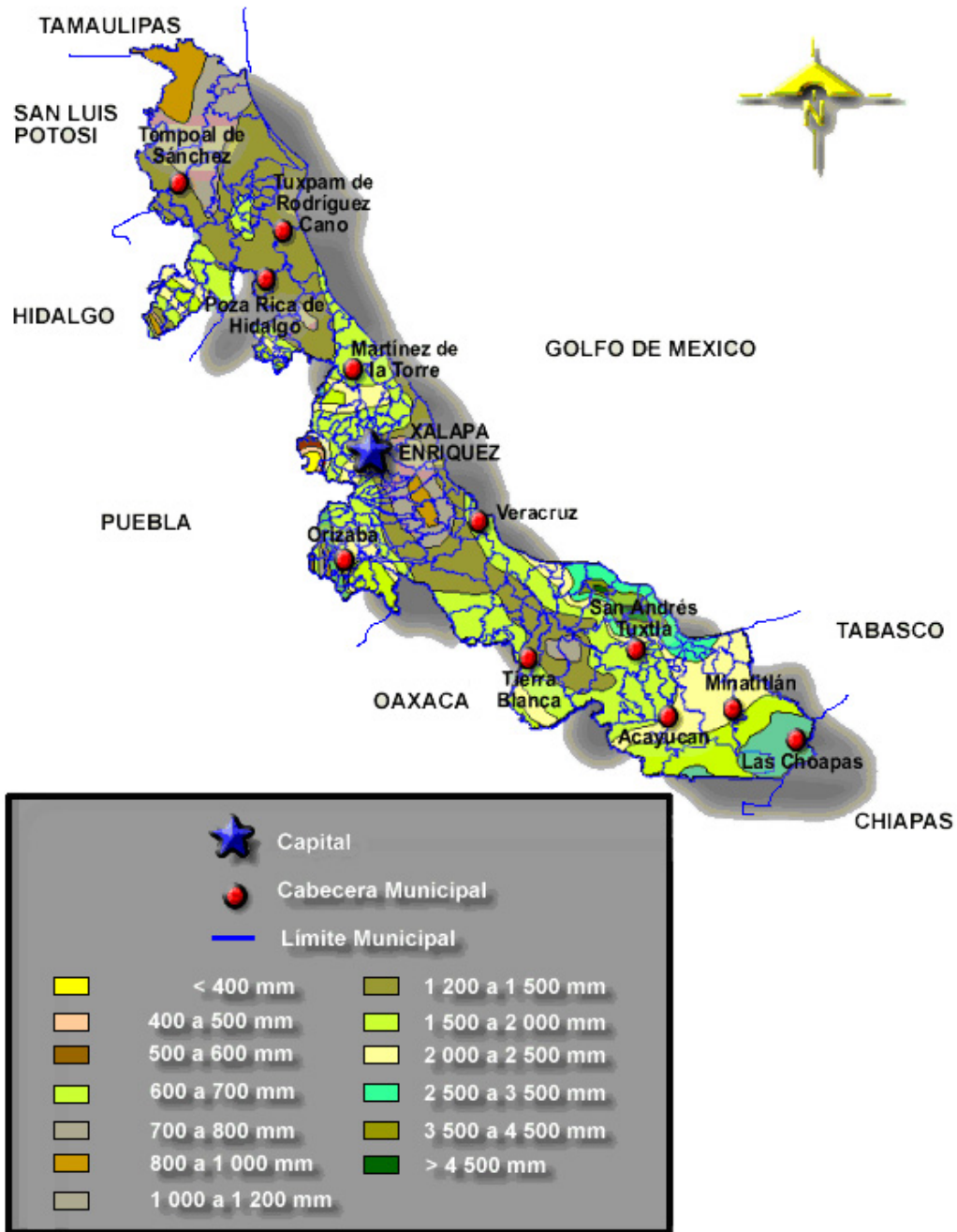


Figura 5.28 Mapa de precipitación promedio anual en el estado de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006a.

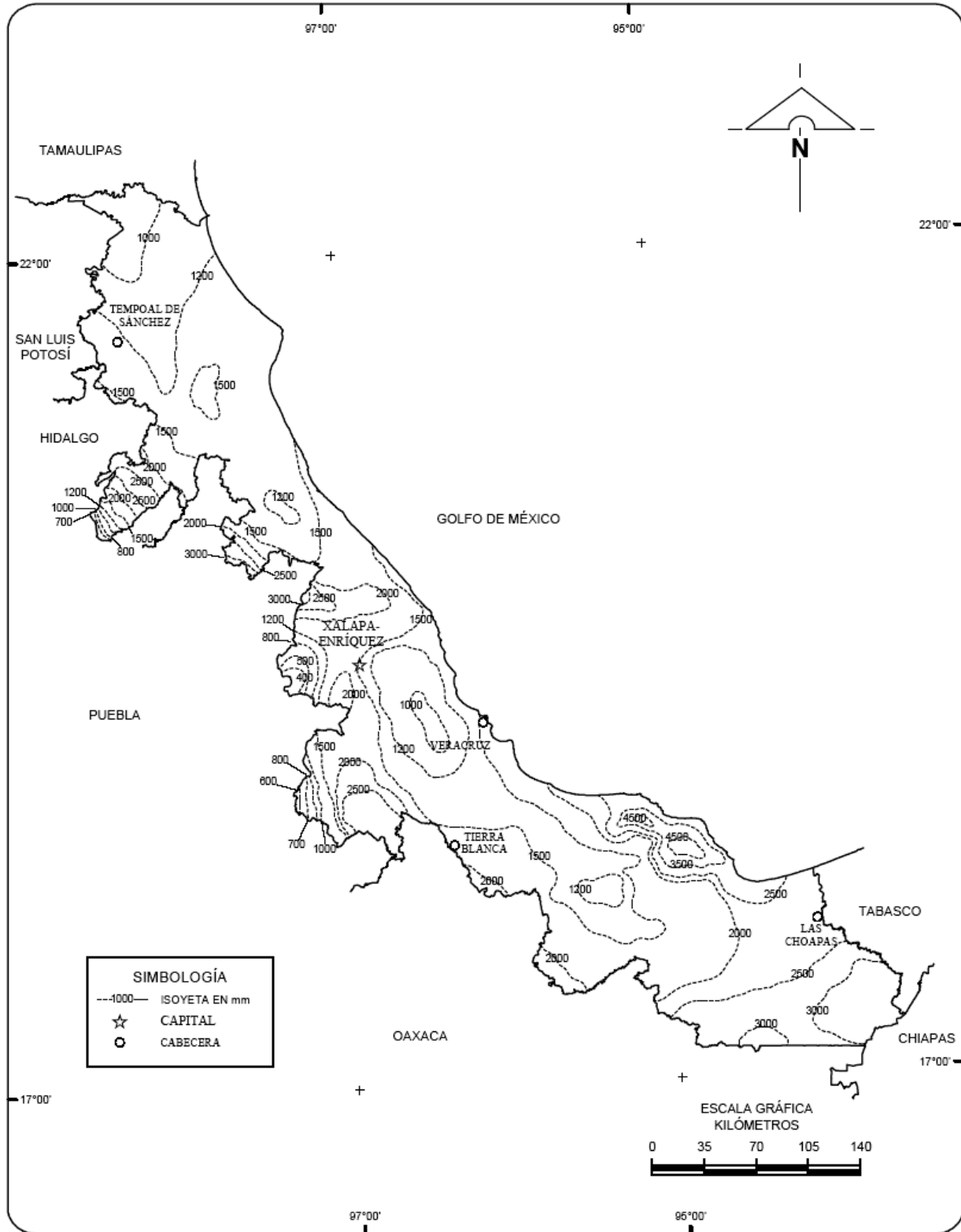


Figura 5.29 Isoyetas del estado de Veracruz.
Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el potencial de ocurrencia de ciclones tropicales, debido al impacto que puede llegar a tener sobre el ambiente, las instalaciones y el buen funcionamiento del sitio de confinamiento. Debe resaltarse el hecho de que estadísticamente se ha determinado que en el Golfo de México el mal clima puede llegar a permanecer hasta siete días seguidos. En la figura 5.30 se indica el peligro por incidencia de ciclones en la República Mexicana.

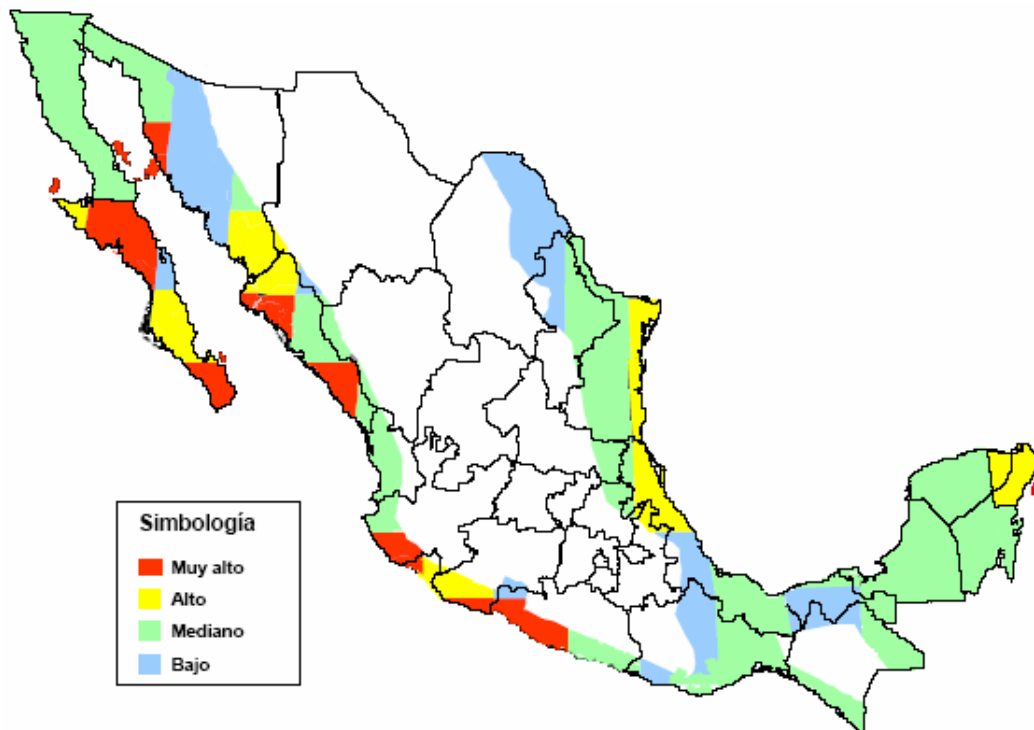


Figura 5.30 Mapa de peligros por incidencia de ciclones.
Fuente: CENAPRED, 2001a.

5.3.8 Aspectos ecológicos

Dentro de los aspectos ecológicos del estado de Veracruz, se encuentran diferentes Áreas Naturales Protegidas tanto de Control Federal como Estatal, las cuales se muestran en las tablas 5.12 y 5.13, la localización geográfica de dichas áreas se muestra en la figura 5.31. Así mismo, tanto la flora como la fauna característica de este estado se presentan en la tabla 5.14.

Tabla 5.12 Áreas Naturales Protegidas de control federal por denominación, al 31 de diciembre de 2004.

FECHA DE DECRETO	DENOMINACIÓN	ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS
	RESERVA DE LA BIOSFERA	
23-XI-1998		Los Tuxtlas
	PARQUES NACIONALES	
04-I-1937		Pico de Orizaba
04-V-1937		Cofre de Perote
04-V-1938		Cañón del Río Blanco
24-XI-1994		Sistema Arrecifal Veracruzano

Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

Tabla 5.13 Áreas Naturales Protegidas de control estatal por denominación, al 31 de diciembre de 2004.

FECHA DE DECRETO	DENOMINACIÓN	ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS
	ZONAS SUJETAS A CONSERVACIÓN ECOLÓGICA	
30-X-1980		San Juan del Monte
11-VI-1991		Tatocapan
29-VIII-1991		Pacho Nuevo
23-I-1992		Río Pancho Poza
11-VIII-1992		Río Filobobos
04-II-1997		Punta Canales o Isla del Amor
17-XI-1999		Santuario del Loro Huasteco
25-XI-1999		Arroyo Moreno
26-XI-1999		Ciénega del Fuerte
	PARQUES URBANOS	
27-XI-1976		Francisco Javier Clavijero
28-XI-1978		Macuiltepetl
23-VIII-1980		Cerro de la Galaxia
30-X-1980		Barragán
23-IX-1986		El Tejar – Garnica
23-IX-1986		Molino de San Roque
27-IX-1986		Medano del Perro
05-V-1992		Cerro de las Culebras
Nota: la información corresponde a las Áreas Naturales Protegidas agrupadas dentro de la categoría de manejo denominada Parques y Reservas Estatales, establecida en la fracción IX de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la cual otorga facultades a los estados para establecer, categorizar y controlar dichas áreas dentro de su jurisdicción territorial.		

Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

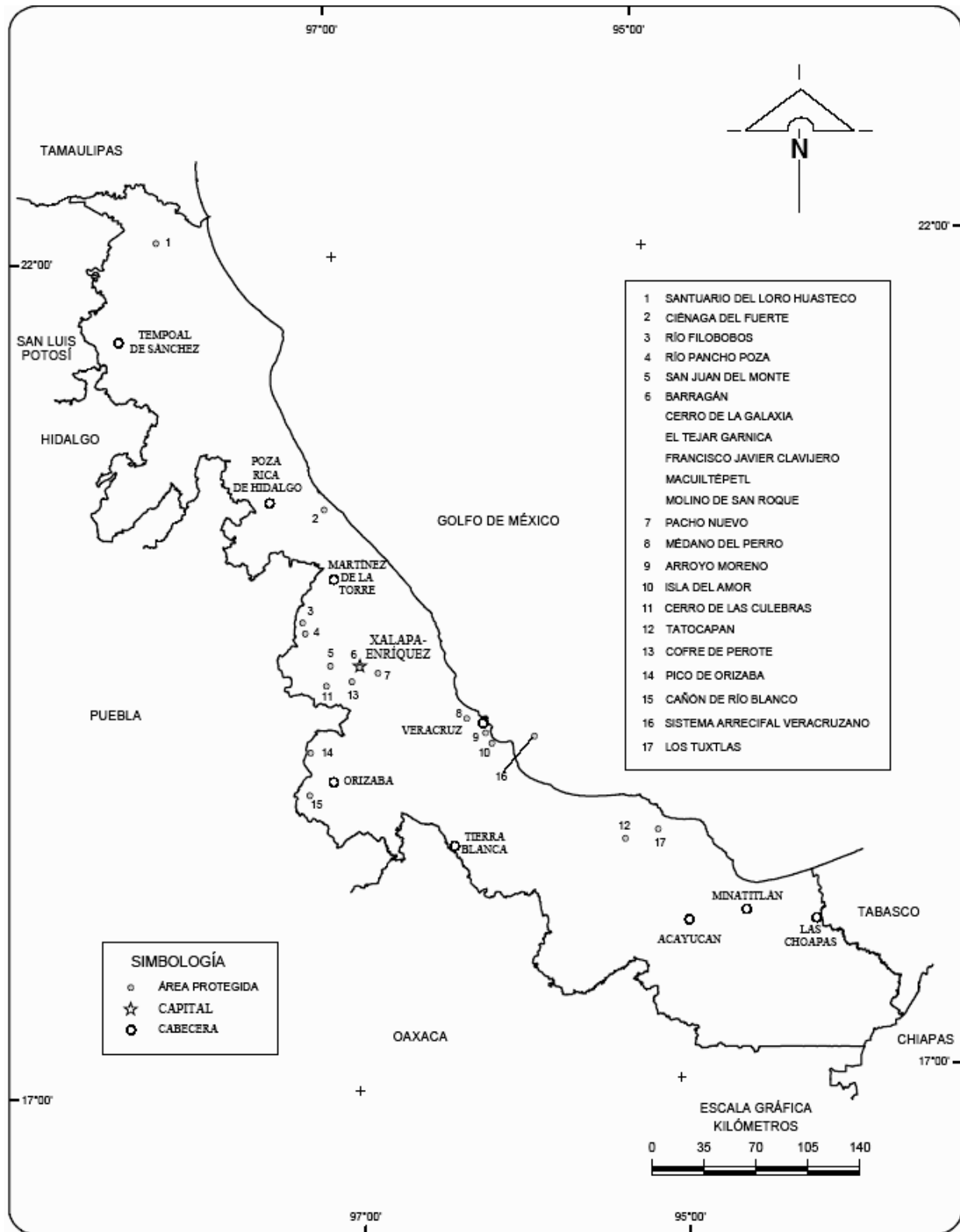


Figura 5.31 Áreas Naturales Protegidas en el estado de Veracruz.
Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

Tabla 5.14 Flora y fauna presentes en el estado de Veracruz.

REGIÓN	FLORA	FAUNA
Huasteca veracruzana	Pastos, cedro, chijol, palo de rosa, ojite y chaca.	Conejo, coyote, mapache, pato, cuervo, zopilote y lechuza.
Huayacocotla	Cedro, caoba, encino, chaca, ceiba, encino, pino y otras.	Jabalí, coyote, armadillo, puma y tigrillo.
Totonacapan	Cedro, caoba, higuera, chaca, zapote, mamey, nanche, guácima y pimienta.	Codorniz, pájaro carpintero, calandria, nauyaca, coralillo, armadillo, mapache, tejón, tortuga, camarón y coatí.
Grandes Montañas	Pino, abeto y oyamel.	Perico, ardilla, zorro, culebra, armadillo, zopilote y búho.
Sotavento	Mangle, ceiba, cedro, roble y palmera.	Tortuga, iguana, víbora de cascabel, gaviota, pelicano y manatí (animal marino en peligro de extinción).
Tuxtlas	Arbusto, bejuco, orquídea, palma y bambú.	Oso hormiguero, mono araña, lagarto, jabalí, ocelote y tigrillo.
Istmo	Caoba, cedro rojo, ceiba, guayacán y chaca.	Jabalí, tigrillo, faisán, guacamaya, tucán, jaguar, nutria y mono.

Fuente: sitio Web <http://www.elbalero.gob.mx/explora/html/veracruz/flora.html>

5.3.9 Agricultura y vegetación

Veracruz ocupa un lugar destacado por la cantidad de productos básicos que genera, entre los que destacan el arroz, el chile verde, el haba y la papa; de frutales como la naranja, el plátano y el mango; y de productos industrializables como la caña de azúcar y el tabaco. La agricultura de temporal es la dominante, su producción se consigue al sembrar en ciclos cortos (especialmente el de primavera - verano). Los cultivos principales en este tipo agrícola son: maíz, frijol, sorgo, arroz palay, café oro, naranja, mango, plátano, piña, limón agrio, mandarina, papaya, toronja, ciruela de almendra y coco fruta, además de tabaco, hule hevea, vainilla, chile verde, papa y sandía. La alta productividad de la agricultura de temporal se debe, primeramente, a la buena precipitación y a que los suelos en llanuras, lomeríos y valles cuentan con las condiciones apropiadas para el buen desarrollo de los cultivos. Los suelos, en su mayoría, tienen buena profundidad y carecen de obstrucciones superficiales. La fertilidad de los mismos va de moderada a alta. (INEGI, 2006a)

La agricultura de riego no ha alcanzado una importancia significativa en el estado, debido primordialmente a las buenas condiciones del temporal, que permiten obtener altas producciones con inversiones bajas. Esta se concentra en los distritos de riego río Blanco, Actopan, río Pánuco y la Antigua, ubicados en las provincias fisiográficas denominadas Llanura Costera del Golfo Norte y del Golfo Sur; así como en pequeñas unidades dispersas por todo el estado. Los suelos en que se realiza son profundos, sin limitantes superficiales o internas que obstruyan el laboreo con maquinaria agrícola. La fertilidad es buena. La variedad de cultivos es poca: caña de azúcar, maíz, arroz palay y papaya. El pastizal cultivado se desarrolla por todo el territorio, pero fundamentalmente en la Llanura Costera del Golfo Norte. Las especies que se siembran frecuentemente son: estrella africana, guinea o privilegio, pangola y jaragua. (*Op. Cit.*)

La vegetación presente en el estado de Veracruz, en orden decreciente de abundancia, se encuentran: selvas alta perennifolia, baja caducifolia y mediana subperennifolia; bosque mesófilo, manglar, sabana, bosques de pino - encino, de encino - pino y de pino; tular, palmar, popal, vegetación de dunas costeras y matorral con izotes (INEGI, 2006a). Toda esta vegetación se distribuye a los largo del territorio y va de las costas a las mayores altitudes, dando lugar a una gran variedad agrícola de temporal y de riego, así como una extensa explotación de la actividad ganadera de pastizales y una valiosa producción silvícola. (Universidad Veracruzana, 2006)

☀ **Selvas.**

En su conjunto, son las comunidades vegetales más abundantes en el estado. La *selva alta perennifolia* se localiza en partes de las sierras y planicies. Los suelos sobre los que crece esta comunidad son diversos, pero en general sus horizontes superiores son ricos en materia orgánica. Las comunidades primarias alcanzan una altura de 25 a 40 m, están constituidas predominantemente por árboles siempre verdes. Otra característica de estas selvas es la gran variedad de formas vegetales, ya que son frecuentes las epífitas, trepadoras leñosas, líquenes y palmas de diferentes tipos y herbáceas de grandes hojas. La *selva mediana subperennifolia* se localiza en dos zonas del estado: una al norte de Tlaxiahuacan y al sur de Tlaxiahuacan, conformada por vegetación secundaria; y la otra al sur de Córdoba, en los límites con Oaxaca. Se encuentra en climas semicálido húmedo con lluvias todo el año y semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano. Los suelos que sostienen esta selva son los acrisoles. La *selva baja caducifolia* se localiza en el centro del estado, entre Jalapa y Alvarado y en las cercanías de Córdoba hasta la ciudad de Veracruz. Se desarrollan bajo clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. Los suelos que la sostienen son de varios tipos, predominando los arcillosos, como vertisoles o feozems, y de poca profundidad. (INEGI, 2006a)

☀ **Bosques.**

Los *bosques, tanto de coníferas como mesófilo de montaña y algunos encinares*, se localizan en dos porciones del estado: una en los límites con Hidalgo, en la subprovincia del Carso Huasteco; y la otra, mayor, en la parte central del estado, dentro de la provincia del Eje Neovolcánico. El *bosque mesófilo de montaña* se encuentra en climas semicálido subhúmedo y templado húmedo con lluvias de verano, cuya precipitación total anual fluctúa entre 1 500 y 2 000 mm. Los suelos que la sustentan son los andosoles, derivados de cenizas volcánicas, de color negro; y los luvisoles, rojos y arcillosos. Su composición florística es diversa, pero existen especies que son frecuentes, y en varios lugares tienden a dominar, como ocozote, mano de león, entre otras; y algunas especies de pino. En la zona de los Tuxtlas hay comunidades muy particulares como los *bosques de baja estatura* (de 8 a 12 m) en las cimas de los volcanes San Martín y Santa Marta. Otro tipo de bosques de menor complejidad estructural y florística son los mixtos, en su mayoría de pino - encino, con alturas de 10 a 25 m. También existen algunas áreas de bosque de pino y de oyamel en el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote. (*Op. Cit.*)

☀ **Otros tipos de vegetación.**

El *manglar* es una vegetación característica de las costas cálidas de México, se localiza en forma de manchones a todo lo largo de la costa veracruzana, sobre suelos inundables, generalmente salinos, anaerobios y muy ricos en materia orgánica; este tipo de vegetación alcanza una altura de 3 a 8 m. La *sabana* es una comunidad formada por extensos pastizales con algunos árboles dispersos. Se desarrolla sobre terrenos planos con drenaje deficiente, por lo que en cierta época del año se inunda. Se encuentra en forma de manchones dispersos entre el puerto de Veracruz y Lerdo de Tejada y al sureste de Acayucan, cerca del poblado Santa Isabel. Otros tipos de vegetación son el tular, vegetación acuática dominada por plantas con una altura de 1 a 3 m, de hojas angostas y alargadas, que se desarrollan en las cercanías de Coatzacoalcos sobre la llanura de inundación; el palmar, constituido por palma real o palma redonda, y el popal, también vegetación acuática. (*Op. Cit.*)

En la tabla 5.15 se proporciona el tipo y el uso que se le da a los productos agrícolas y a la vegetación de Veracruz. En la figura 5.32 se muestra la distribución de los tipos de vegetación y agricultura que se desarrollan en el estado de Veracruz.

Tabla 5.15 Agricultura y vegetación desarrolladas en Veracruz.

CONCEPTO	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE LOCAL	USO
Agricultura			
43.23% de la superficie estatal	<i>Zea mays</i>	Maíz	Comestibles
	<i>Saccharum officinarum</i>	Caña de azúcar	
	<i>Carica papaya</i>	Papaya	
	<i>Mangifera indica</i>	Mango	
	<i>Citrus sinensis</i>	Naranja dulce	
Pastizal			
26.81% de la superficie estatal	<i>Paspalum vaginatum</i>	Gramma	Forrajes
	<i>Cynodon plectostachyum</i>	Estrella de África	
	<i>Digitaria decumbens</i>	Pangola	
	<i>Pennisetum clandestinum</i>	Kikuyu	
	<i>Panicum maximum</i>	Privilegio	
Bosque			
3.67% de la superficie estatal	<i>Pinus hartwegii</i>	Pino	Maderas
	<i>Abies religiosa</i>	Oyamel	
	<i>Alnus arguta</i>	Ilite	
	<i>Quercus affinis</i>	Encino	
	<i>Liquidambar styraciflua</i>	Ocozote	
Selva			
23.81% de la superficie estatal	<i>Bursera simaruba</i>	Palo mulato	Madera
	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	Guaje	Madera
	<i>Sabal mexicana</i>	Palma real	Forraje
	<i>Dendropanax sp.</i>	Tronadora	Madera
	<i>Ceiba sp.</i>	Ceiba	Artesanía
Otros			
2.48% de la superficie estatal			
Nota: sólo se mencionan algunas especies útiles.			

Fuente: INEGI. Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:1000000. INEGI. Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000.

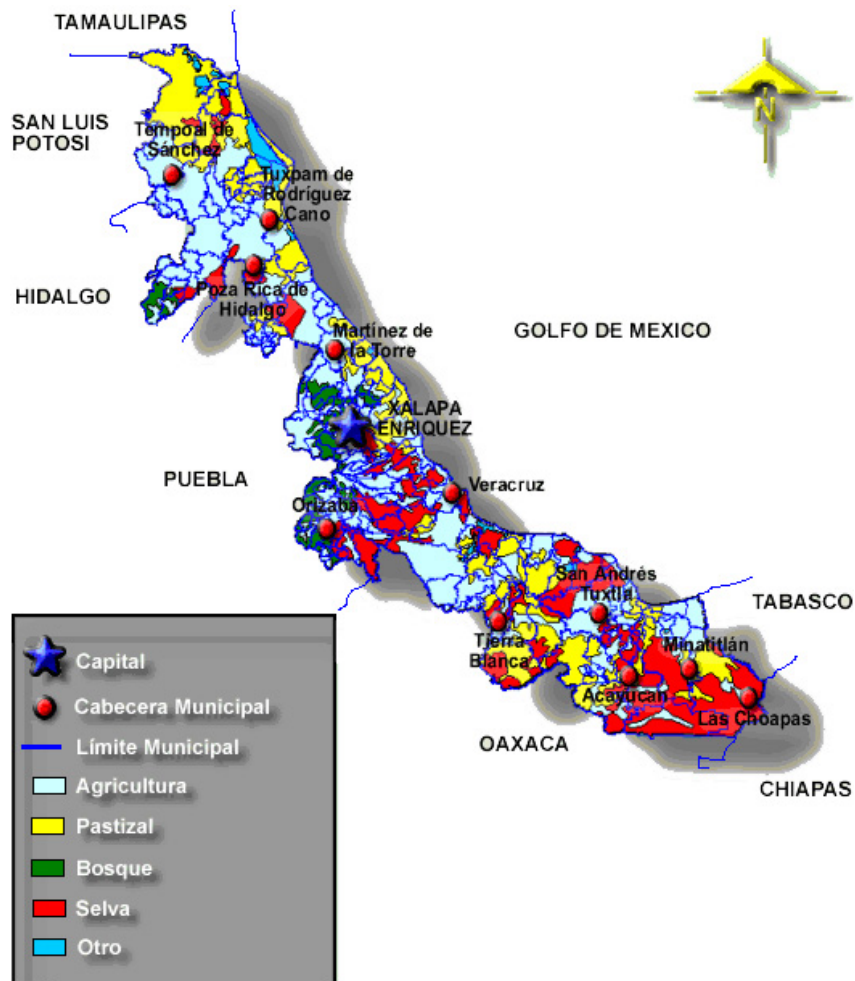


Figura 5.32 Distribución de la vegetación y agricultura en el estado de Veracruz.
Fuente: INEGI, 2006a.

5.3.10 Características sísmicas

Durante el siglo pasado ocurrieron 71 temblores en la República Mexicana y sus alrededores inmediatos con magnitud mayor o igual a 7; de los cuales el 77% ocurrieron a profundidades menores de 40 km, es decir, muy cerca de la superficie terrestre.

Los epicentros de la mayor parte de los terremotos de gran magnitud (mayores o iguales que 7; ver figura 5.11), que llegan a ocasionar grandes daños, se ubican en las costas de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. También han ocurrido, aunque con menor frecuencia, grandes sismos en el centro y sur de Veracruz y Puebla, en el norte y centro de Oaxaca y Chiapas, en la zona fronteriza entre Baja California y los Estados Unidos de Norteamérica, e incluso en el Estado de México y Sonora. La profundidad típica de los eventos costeros es de 15 a 25 km, mientras que los eventos con epicentros tierra adentro suelen tener profundidades alrededor de 60 ó 70 km. (CENAPRED, 2004)

La información acerca de la instrumentación y los registros obtenidos por distintas redes operadas en México desde 1958, se encuentra conjuntada en la *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes*, que actualmente cuenta con alrededor de 14 000 registros generados por más de 1 500 temblores. Se recomienda ampliamente la consulta de este banco de información, especialmente por parte de ingenieros o arquitectos. (Op. Cit.)

Regionalización sísmica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En el Manual de Obras Civiles de la CFE, en el Capítulo de Diseño por Sismo, se encuentra publicado el mapa de Regionalización Sísmica de México, tal como se muestra en la figura 5.12.

Mapas de peligro. Los mapas de peligro por sismo que se muestran a continuación, son algunos de los resultados que se han obtenido del programa Peligro Sísmico en México (PSM, 1996), que constituye un sistema de información cuantitativa sobre el peligro sísmico en la República Mexicana. Con el propósito de facilitar la definición de niveles de peligro para un sitio dado, se muestran los mapas más representativos (figuras 5.33 a 5.37), éstos representan las aceleraciones máximas para terreno firme con diferentes periodos de retorno.



Figura 5.33 Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 10 años.

Fuente: PSM, 1996.

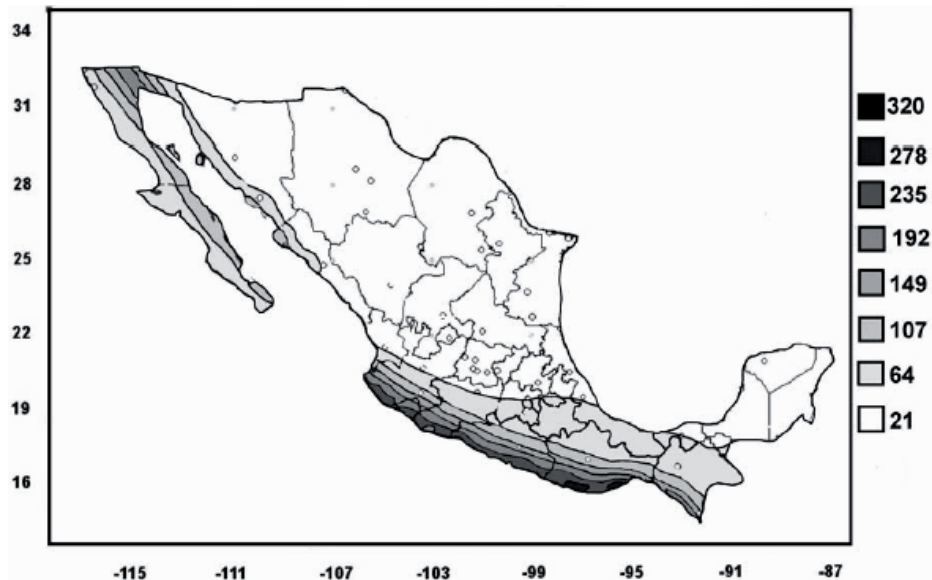


Figura 5.34 Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 50 años.

Fuente: PSM, 1996.

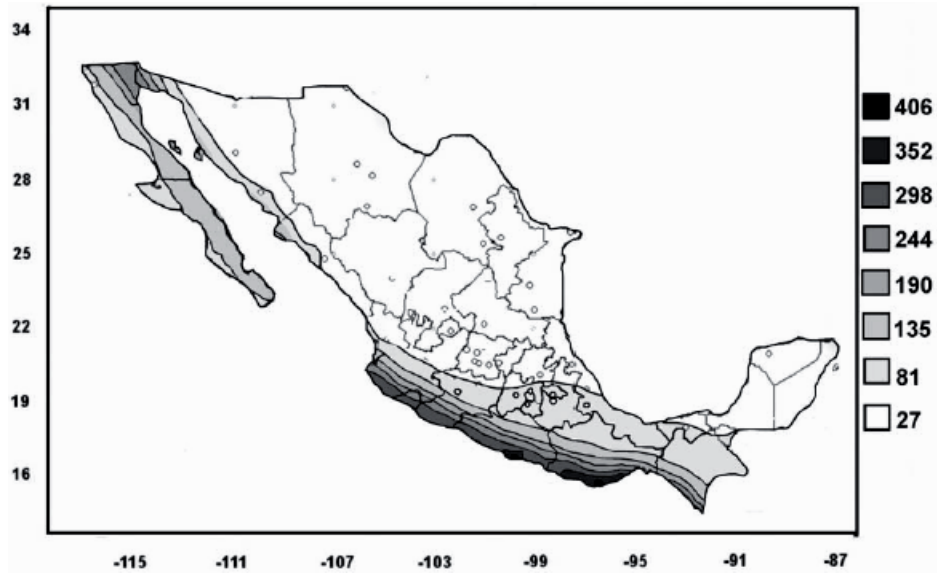


Figura 5.35 Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 100 años.
Fuente: PSM, 1996.

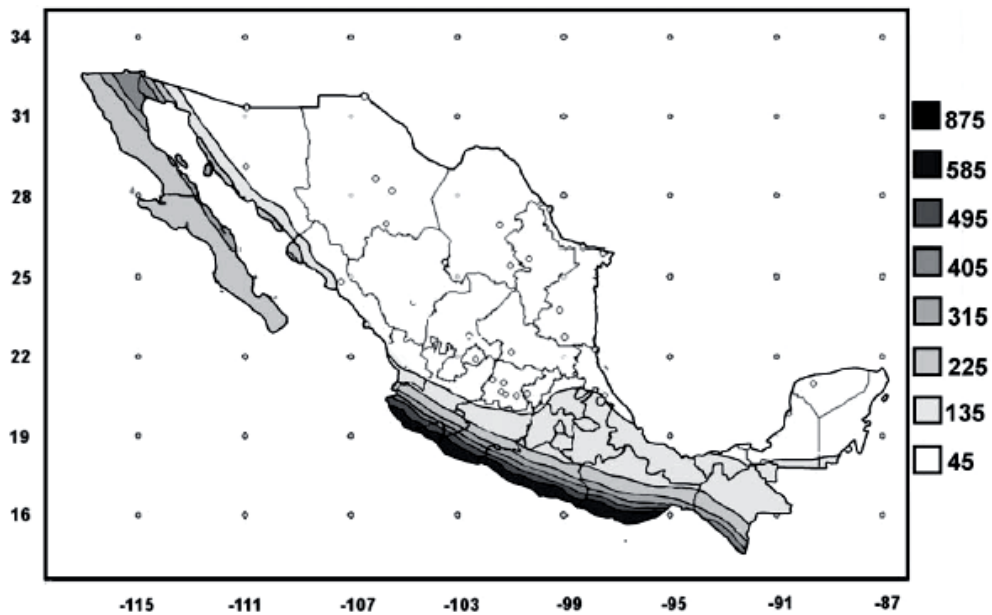


Figura 5.36 Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 500 años.
Fuente: PSM, 1996.

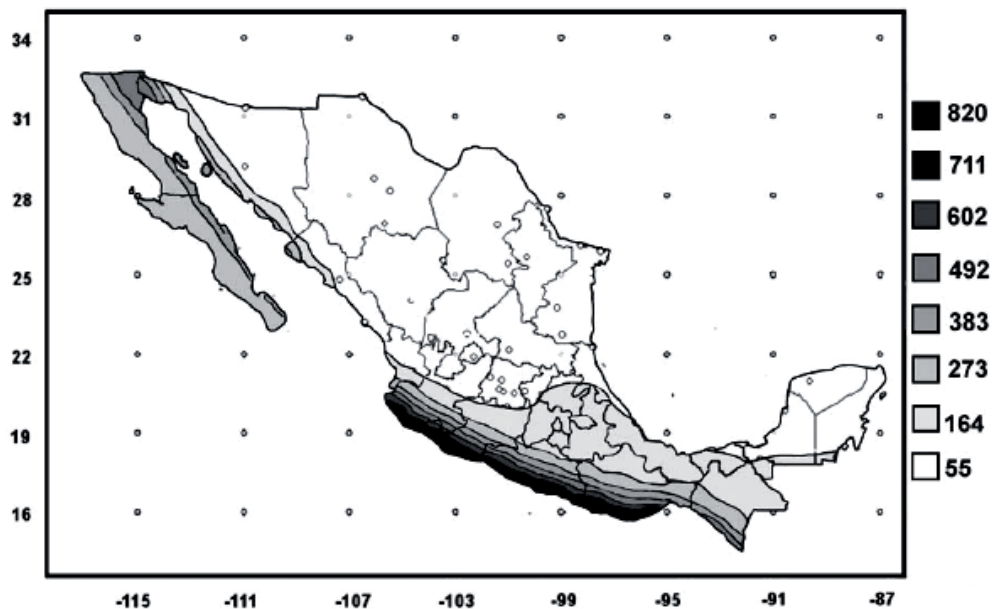


Figura 5.37 Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 1 000 años.

Fuente: PSM, 1996.

A partir de la información anterior, se puede observar que el estado de Veracruz se encuentra comprendido parcialmente por las zonas B y C, de la clasificación de la Comisión Federal de Electricidad, las cuales presentan actividad sísmica con menor frecuencia o bien, están sujetas a aceleraciones del terreno que no rebasan el 70% de la aceleración de la gravedad (g). Por otra parte, al analizar los mapas de Peligro Sísmico en México, se aprecia que el estado de Veracruz se encuentra dentro de los Estados de menor peligro sísmico.

5.3.11 Crecimiento de centros urbanos

Tamaño, composición y dinámica de la población.

De acuerdo con la información proporcionada por el INEGI (2006b), al 17 de octubre de 2005, el estado de Veracruz tuvo un total de 7 110 214 residentes habituales, los que representan un 6,9% de los 103,2 millones de habitantes de la República Mexicana, ocupando el tercer lugar a nivel nacional, sólo después del Estado de México y del Distrito Federal. La tasa de crecimiento media anual del año 2000 al 2005 fue de 0,51%, dicha tasa fue menor a la observada en el periodo 1995 – 2000 la cual fue de 0,59%. En cifras absolutas, de febrero de 2000 a octubre de 2005, la entidad creció a razón de poco más de 37 000 habitantes por año, cifra que se asemeja al total de población del municipio de Río Blanco. De hecho, el total de habitantes de la entidad veracruzana, equivale a la suma de la población de los estados de Aguascalientes, Baja California Sur, Colima, Nayarit, Quintana Roo, Tlaxcala y Yucatán.

Distribución geográfica.

Los municipios más poblados de la entidad son: Veracruz con 512 310 habitantes, Xalapa con 413 136 habitantes, Coatzacoalcos con 280 363 habitantes, Córdoba con 186 623 habitantes, Poza Rica con 181 438 habitantes y Papantla con 152 863 habitantes; en conjunto, estos seis municipios, concentran alrededor de la cuarta parte de la población total de la entidad. En contraste, los municipios menos poblados son: Landero y Coss, Aquila, Coetzala, Tuxtilla y San Andrés Tenejapan, mismos que concentran sólo un 0,1% del total de los habitantes de la entidad. (INEGI, 2006b)

Dinámica del crecimiento de los municipios.

Cada uno de los municipios crece a un ritmo distinto, en función del comportamiento que tienen en ellos los componentes de la dinámica demográfica, esto es, la natalidad, la mortalidad y los movimientos migratorios. Durante el periodo 2000 - 2005, los municipios con mayor tasa de crecimiento fueron

Filomeno Mata con 5,2% e Ixhuatlancillo con 4,9%. Por el contrario, las tasas inferiores se ubican en Juchique de Ferrer con -2,6% y Tenochtitlán con -2,0%. (*Op. Cit.*)

Distribución por tamaño de localidad.

El Censo 2005 registra 20 578 localidades, de las cuales poco más de 20 000 tienen menos de 2 500 habitantes y en ellas reside el 39,4% de la población total. Por otra parte, en 284 localidades de 2 500 habitantes y más, se concentra un 60,6 % de la población. Veracruz, Xalapa, Coahuila de Zaragoza, Poza Rica y Córdoba, se mantienen como los municipios con más población en localidades mayores a 2 500 habitantes. En contraste, la totalidad de la población de municipios como Cotaxtla, Benito Juárez, Chontla, Chalma y Calchahuaco, son representativos del amplio universo de la población rural dispersa de la entidad, al sumar poco más de 75 000 habitantes en cerca de 500 pequeñas localidades de menos de 2 500 habitantes. (*Op. Cit.*)

Fecundidad.

Conocer el nivel y la estructura de la fecundidad, es de gran relevancia, debido a que incide de manera importante en el tamaño y la estructura por edad de la población. Con relación a este tema, el II Censo 2005, se indica que la población femenina de 12 años y más alcanzan la cifra de 2 815 359 personas, cerca de 210 000 personas más (8%) respecto al año 2000. De ellas el 30,6% no tienen hijos, el 41,4% tiene de 1 a 3 hijos, y un 25,1% cuenta con 4 o más hijos. (*Op. Cit.*)

Migración.

El fenómeno de la migración se origina cuando la población cambia el lugar de su residencia de un municipio a otro, a otra entidad o a otro país. El Censo 2005 registra este tipo de movimientos poblacionales con respecto al lugar de residencia de los habitantes cinco años atrás, es decir en referencia al mes de octubre del año 2000. En este contexto, se señala que en octubre del 2000, 121 370 personas de 5 o más años de edad vivían en una entidad diferente a Veracruz, 8 910 personas residían en los Estados Unidos de Norteamérica y 1 469 personas en otro país; en conjunto, este grupo representa el 2,1% del total de la población del estado. Debe indicarse que dicho indicador en el 2000 fue de 2,6%. (*Op. Cit.*)

5.3.12 Accesibilidad

El estado de Veracruz cuenta con diferentes vías de comunicación, tanto terrestres como aéreas y marítimas. Las vías de comunicación terrestres con que cuenta Veracruz van desde vías de ferrocarril, carreteras federales libres y de cuota, hasta diversos caminos de terracería. Lo anterior se puede observar en la figura 5.38. Dentro de las principales vías de comunicación terrestres destacan las carreteras siguientes:

- La carretera federal de cuota número 150, que recorre la distancia entre las ciudades de México, Puebla y Córdoba. La carretera libre número 150 parte del Distrito Federal hacia el estado de Veracruz, de la ciudad de Puebla sigue hacia Tecamachalco y de ahí entra a Veracruz por la sierra de Acultzingo, continúa por la zona conurbada de Ciudad Mendoza, Nogales, Río Blanco y Orizaba, en la que se le une la carretera número 123 con destino a Zongolica.
- De noroeste a sureste, la carretera número 180 pasa por zonas agrícolas, ganaderas e industriales de gran trascendencia, en las que se ubican las poblaciones de Pueblo Viejo, Ozuluama, Naranjos, Potrero de Llano, entre otras. En esta carretera, además de la anterior, entroncan la mayoría de las carreteras que llegan a este estado provenientes de interior del país, como la carretera federal número 105, en el norte, mediante la cual se va de Pachuca, Hidalgo, a Tampico, Tamaulipas, entre otras.
- La carretera número 130, México - Poza Rica, antes de llegar a la ciudad petrolera pasa por Pachuca y Tulancingo, Hidalgo, así como por Huauchinango, Puebla.
- En el centro del estado corre la carretera federal número 140, que parte de Puebla y atraviesa por San Hipólito, San Salvador el Seco y Alchichica, Puebla, para llegar al puerto de Veracruz.

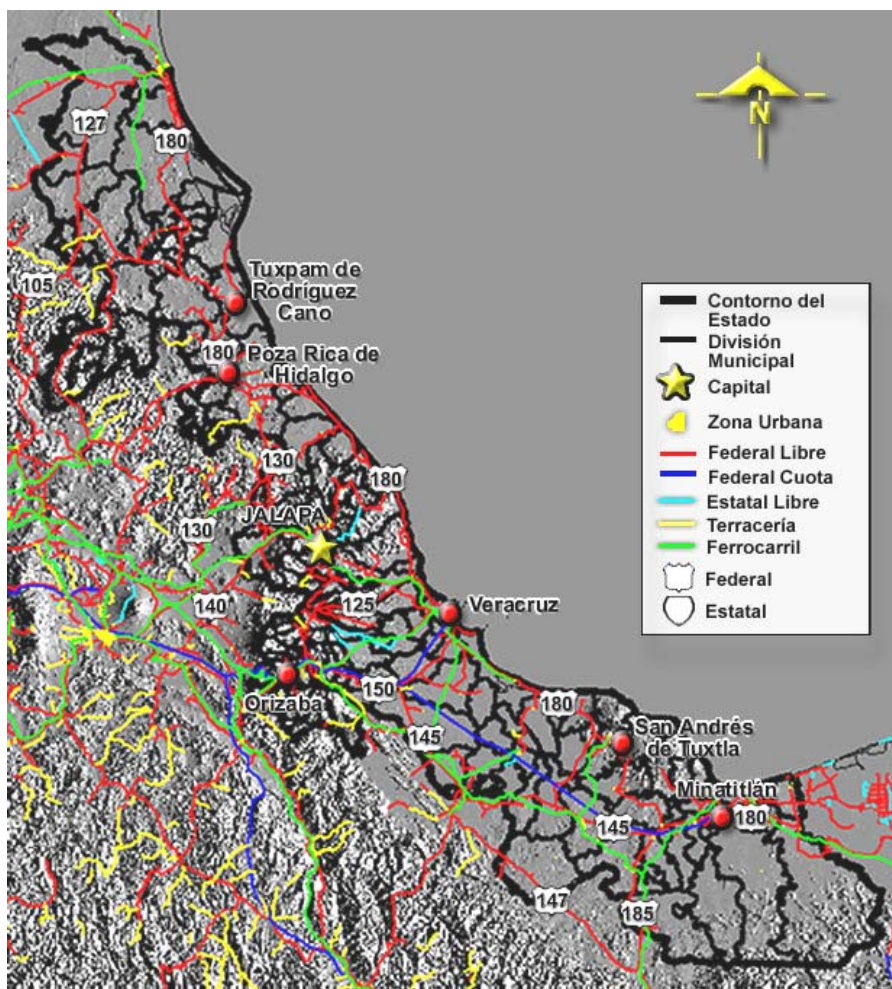


Figura 5.38 Mapa de las principales vías terrestres en el estado de Veracruz.

Fuente: INEGI, 2006a.

Mediante el ferrocarril que llega a Veracruz se mueve una gran parte de la amplia gama de productos que se embarcan y desembarcan en los puertos de Veracruz y Coatzacoalcos. Véase la figura 5.39.

La red ferroviaria en este estado tiene una longitud de 168,90 km, distribuidos principalmente en la porción centro – sur. El ferrocarril Transistímico, construido con la finalidad de comunicar al puerto de Coatzacoalcos, en el Golfo de México, con el de Salina Cruz, en el Océano Pacífico, penetra en territorio veracruzano por Jesús Carranza y llega hasta Coatzacoalcos. Aquí hace contacto con otra línea ferroviaria, cuyo destino es la península de Yucatán. (INEGI, 2006a)

Por lo que corresponde a los aeropuertos, el estado cuenta con instalaciones que prestan servicios tanto a nivel nacional como internacional; y también existen aeródromos que complementan este tipo de transportación. Ver figura 5.39. (Op. Cit.)

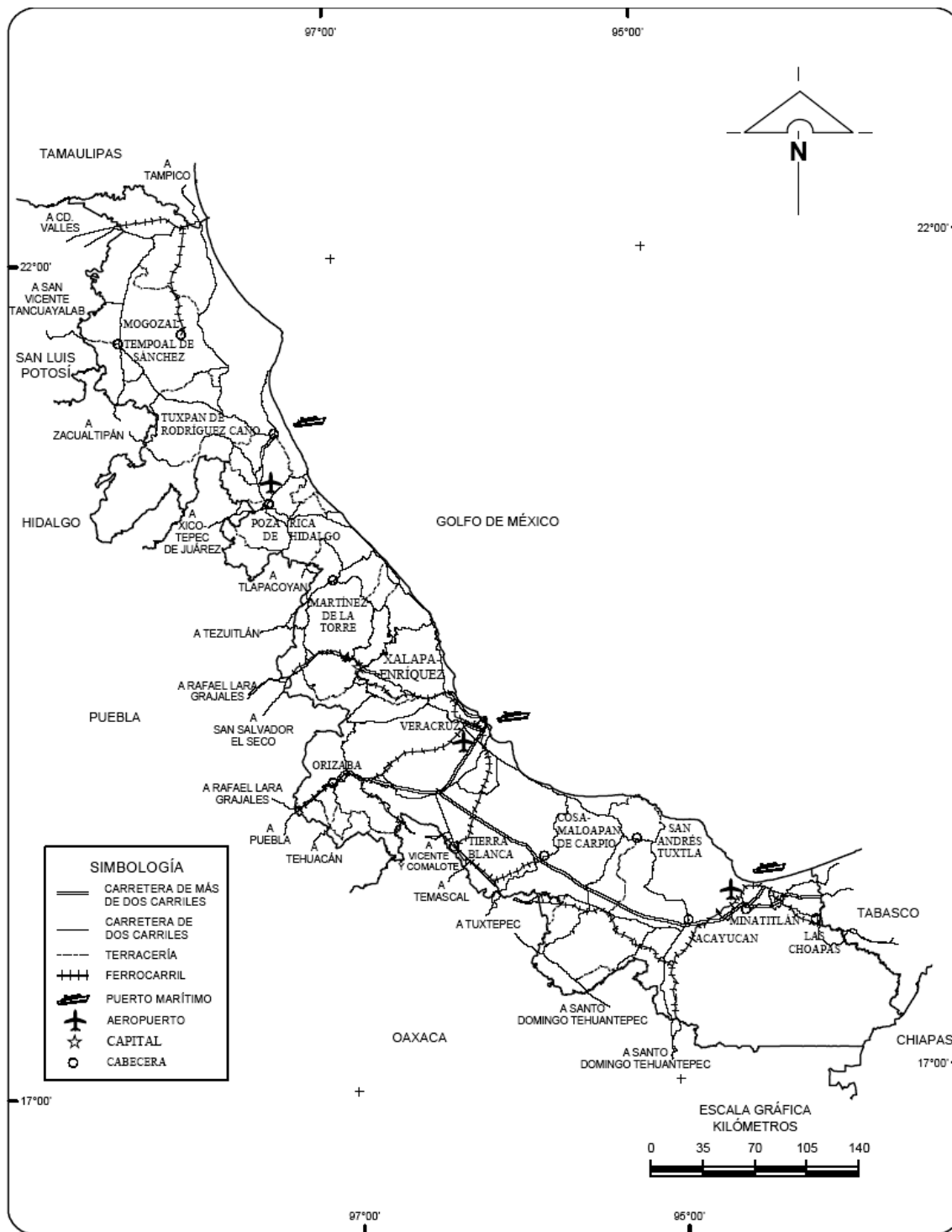


Figura 5.39 Mapa de las principales vías de comunicación en el estado de Veracruz.

Fuente: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005.

El puerto de Veracruz es el más antiguo del país, uno de los de mayor importancia, y es de los pocos que cuentan con un sistema de Administración Portuaria Integral (API). Ver figura 5.39. El puerto de Coatzacoalcos es importante porque aquí se realiza el movimiento de petróleo, azufre y fertilizantes en la República Mexicana. El puerto de Tuxpan es el más cercano a la ciudad de México, pero no tiene la relevancia de los otros puertos mencionados. (Op. Cit.)

CAPITULO VI. RESULTADOS

6.1 ZONAS CON PRESENCIA DE DOMOS SALINOS EN MÉXICO

La presencia de domos salinos en el país constituye un aspecto relevante en la búsqueda de sitios potenciales que puedan funcionar como sitios de confinamiento de residuos peligrosos. De esta manera se buscó las zonas en las que existen estructuras salinas de tamaño considerable, independientemente de si estos son aptos o no para funcionar como sitios de disposición de residuos peligrosos, obteniéndose el mapa que se muestra en la figura 6.1. Debe recalcar el hecho de que esta parte del estudio se realizó únicamente con información proveniente de los estudios realizados por Castillon y Larios, en 1962, y por López R., en 1979, debido a que fueron las únicas fuentes en las que se encontró la información necesaria para este fin.



Figura 6.1 Zonas con presencia de grandes estructuras salinas.
Fuente: López R., 1979; Castillon y Larios, 1962, modificado por el autor.

Como se puede apreciar en la figura anterior, existen diferentes zonas del país que cuentan con este tipo de estructuras, sin embargo debe tomarse en consideración varios aspectos adicionales. De esta manera se tiene que los estados de Veracruz, Tamaulipas y Chihuahua son los que tienen mayor potencial de encontrar sitios que puedan emplearse como sitios de confinamiento de residuos peligrosos líquidos de la industria petrolera mexicana, mientras que el estado de Yucatán es en el que existen menos posibilidades de que se llegue a desarrollar este tipo de solución, a pesar de que cuenta con varias estructuras salinas, esto se debe a la alta probabilidad de hallar estratos de material soluble al agua, lo cual puede acarrear graves problemas de dispersión de contaminantes.

No obstante que el estado de Chihuahua cuenta con domos salinos, su distancia a los principales centros productores de petróleo y refinerías del país, hace que la factibilidad financiera del empleo de este tipo de estructuras sea considerablemente menor en comparación con los estados de Tamaulipas y Veracruz. Por otra parte, tal como se plantea al inicio del Capítulo V, debido a su cercanía los principales centros productores de petróleo y refinerías del país, el estado de Veracruz es el que tiene un potencial de desarrollo más alto para este tipo de solución.

De esta manera, se encontró que en el estado de Veracruz se cuenta con domos y estructuras salinas en la parte veracruzana del Istmo de Tehuantepec, también conocido como Istmo Veracruzano, y en la zona de la Faja de Oro, tal como se muestra en las figuras 6.2 y 6.3.

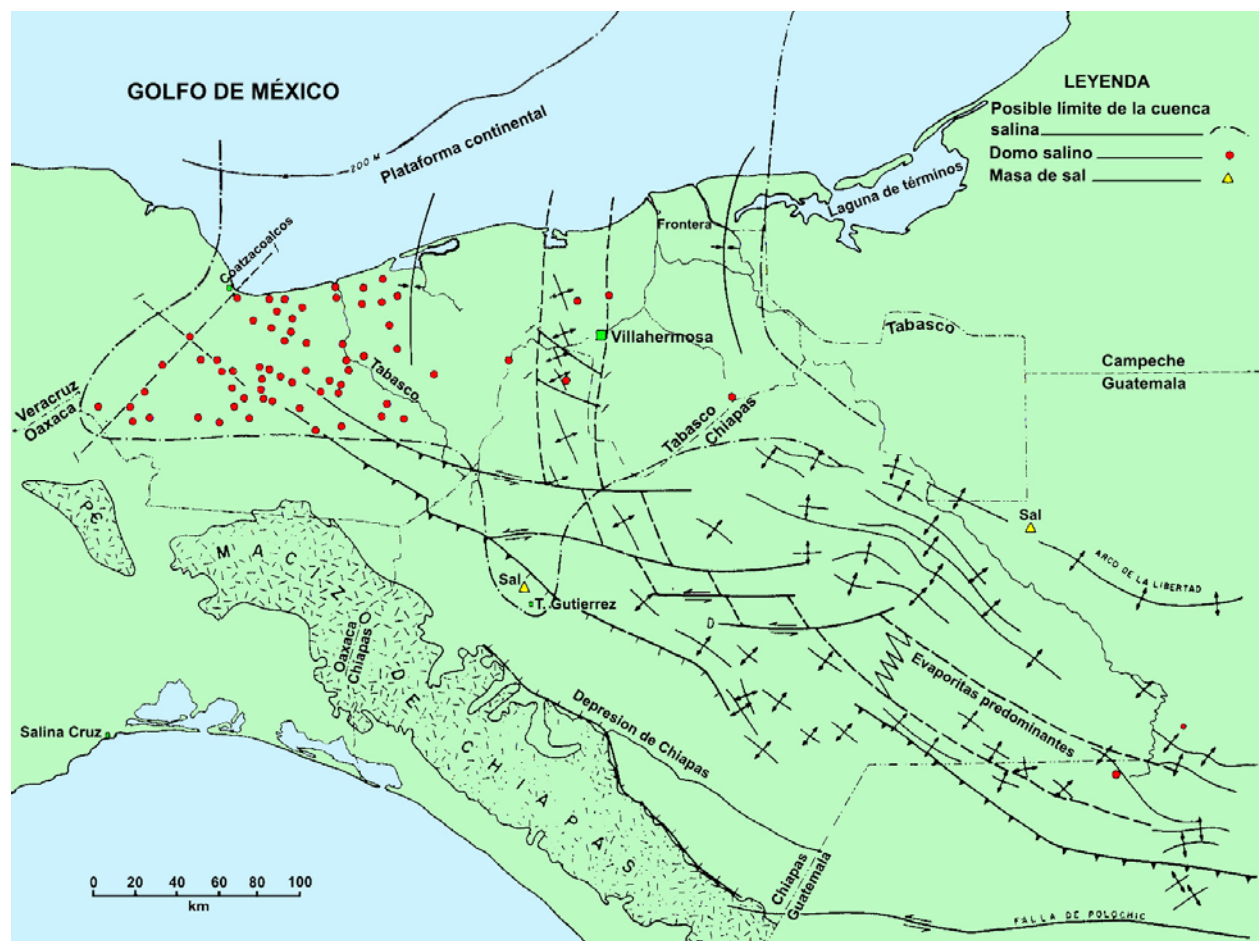


Figura 6.2 Estructuras y domos salinos en el Istmo de Tehuantepec.
 Fuente: López R., 1979, modificado por el autor.

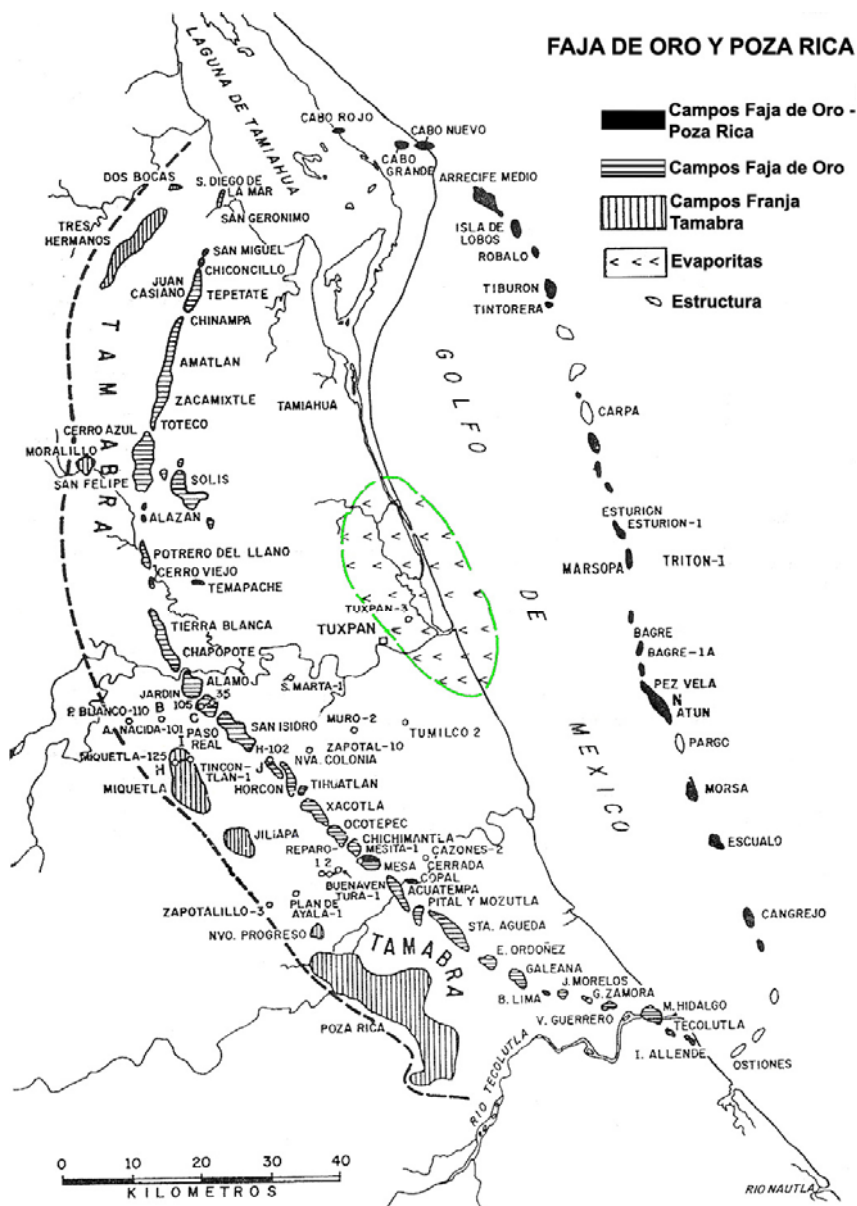


Figura 6.3 Estructuras salinas en la Faja de Oro y Poza Rica, Veracruz.
 Fuente: López R., 1979, modificado por el autor.

Debe hacerse notar que algunos de los domos salinos que se aprecian en la figura 6.2 actualmente se explotan con la finalidad de extraer la sal de su interior y comercializarla para su uso. No obstante, debido a la dificultad para tener acceso a la información sobre cuales son los domos que se emplean con tal finalidad, en este trabajo no se indica cuales de ellos se emplean como sitios de extracción de sal.

Una vez definida la ubicación de los domos salinos en el país, específicamente en el Istmo de Tehuantepec, se tiene que buscar los sitios que cumplen con los requisitos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-145-SEMARNAT-2003, los cuales ya fueron descritos en el Capítulo II, con la intención de determinar finalmente los domos salinos que pueden funcionar como sitios de disposición final de residuos peligrosos contaminados con hidrocarburos, para lo cual es necesario presentar una breve descripción de la zona veracruzana del Istmo de Tehuantepec, orientada a la descripción de los parámetros indicados en el Capítulo II.

6.2 EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

El istmo de Tehuantepec es una región comprendida entre los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz. Se trata de la zona más angosta entre dos océanos que posee México. Algunos geógrafos opinan que en este punto inicia la zona ístmica de América Central. Es una zona rica en petróleo y en recursos maderables. También es una de las regiones con mayor presencia indígena del país. En ella conviven huaves, zapotecos y zoques. Los principales centros de población del Istmo de Tehuantepec son Coatzacoalcos y Minatitlán, en Veracruz; y Juchitán de Zaragoza, Salina Cruz, Matías Romero, Ciudad Ixtepec y Tehuantepec, en el estado de Oaxaca. Ésta última población le confiere su nombre a la región. (Wikipedia, 2006)

6.2.1 Geografía física

El Istmo de Tehuantepec es una región de México en donde los océanos Atlántico y Pacífico se localizan a una menor distancia. Aproximadamente corresponde a las regiones Olmeca, del estado de Veracruz; y a los distritos de Tehuantepec y Juchitán, que conforman la región del Istmo oaxaqueño.

El Istmo de Tehuantepec comprende una parte de México localizada entre los meridianos 94° y 96° oeste. En su punto más angosto, el Istmo alcanza los 200 km de distancia entre el Océano Pacífico (o más precisamente, el Golfo de Tehuantepec) y el Golfo de México; o bien, alcanza los 192 km entre el Golfo de México y la cabecera del Lago Superior, que desemboca en el Golfo de Tehuantepec. En Tehuantepec, la Sierra Madre del Sur se convierte en un paso de poca altura y plano, apenas ondulado por algunas colinas que se levantan en la llanura.

6.2.2 Relieve

Es una zona prácticamente llana, salvo por la presencia de lomas y cerros que componen la Sierra Atravesada. La Sierra Atravesada tiene 250 km de longitud, y su punto más alto se encuentra localizado en el paso de Chivela, a una altura aproximada de 250 msnm. Más al oriente, cerca del límite entre Oaxaca y Chiapas, se localiza el Cerro Azul, que alcanza una altitud de 2 300 msnm. (Wikipedia, 2006)

Al oriente de los llanos del Istmo de Tehuantepec, en el territorio chiapaneco, se levantan las sierras del Norte de Chiapas y la Sierra Madre de Chiapas. Al poniente, en el estado de Oaxaca, se localizan la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Oaxaca, conocida también como Sierra de Juárez. Al norte, en la costa veracruzana, la sierra de los Tuxtlas rompe la planicie costera meridional del Golfo de México. En la figura 6.5 se presenta el relieve del Istmo de Tehuantepec. (*Op. Cit.*)

6.2.3 Climatología

Toda la región se encuentra en una zona de clima tropical cálido, excepto en las elevaciones de la Sierra Atravesada, donde los vientos provenientes del Pacífico proporcionan un clima comparativamente más cálido y saludable. La precipitación promedio anual en la vertiente atlántica del Istmo de Tehuantepec (costa del Golfo de México) es de 3 960 mm, en tanto que las temperaturas llegan a alcanzar los 35 °C. Cabe mencionar que la vertiente del Pacífico tiene un clima más seco y menos cálido.



Figura 6.5 Relieve del Istmo de Tehuantepec.
Fuente: Wikipedia, 2006.

6.2.4 Hidrología

En la figura 6.6 se muestra la hidrología del Istmo de Tehuantepec. Los ríos del Istmo de Tehuantepec pueden agruparse en dos vertientes. Al norte, en el territorio veracruzano, se encuentra la vertiente del Golfo de México. En esta vertiente desembocan los ríos que forman parte de la Región Hidrológica número 29. Pertenecen a esta región dos cuencas: la del río Coatzacoalcos, en la que se encuentran numerosos afluentes de éste que es uno de los ríos más caudalosos de México. Casi todos ellos bajan de las laderas del norte de la Sierra Madre de Oaxaca. Destaca el río Uxpanapa en territorio veracruzano, y los ríos Alana, Puxmetacán - Trinidad, El Corte y Aguacatenango - Jaltepec, en Oaxaca. La cuenca del río Coatzacoalcos tiene una superficie de casi 18 000 km², y el río que le da nombre alcanza una longitud de 325 km. Desagua en el Golfo de México un total 32 752 Hm³/s. Con estas cifras, el río Coatzacoalcos es el cuarto río más caudaloso de la vertiente del Golfo mexicano, después del río Grijalva, el río Papaloapan y el río Pánuco. Otra cuenca perteneciente a esta región hidrológica es la del río Tonalá, río que señala el límite entre los estados de Veracruz y Tabasco, y que además comprende los pantanos

tabasqueños en los que se localiza La Venta. Aunque de dimensiones más modestas, la cuenca del Tonalá desagua más de 11 000 Hm³/s, también en el Golfo de México. (Wikipedia, 2006)

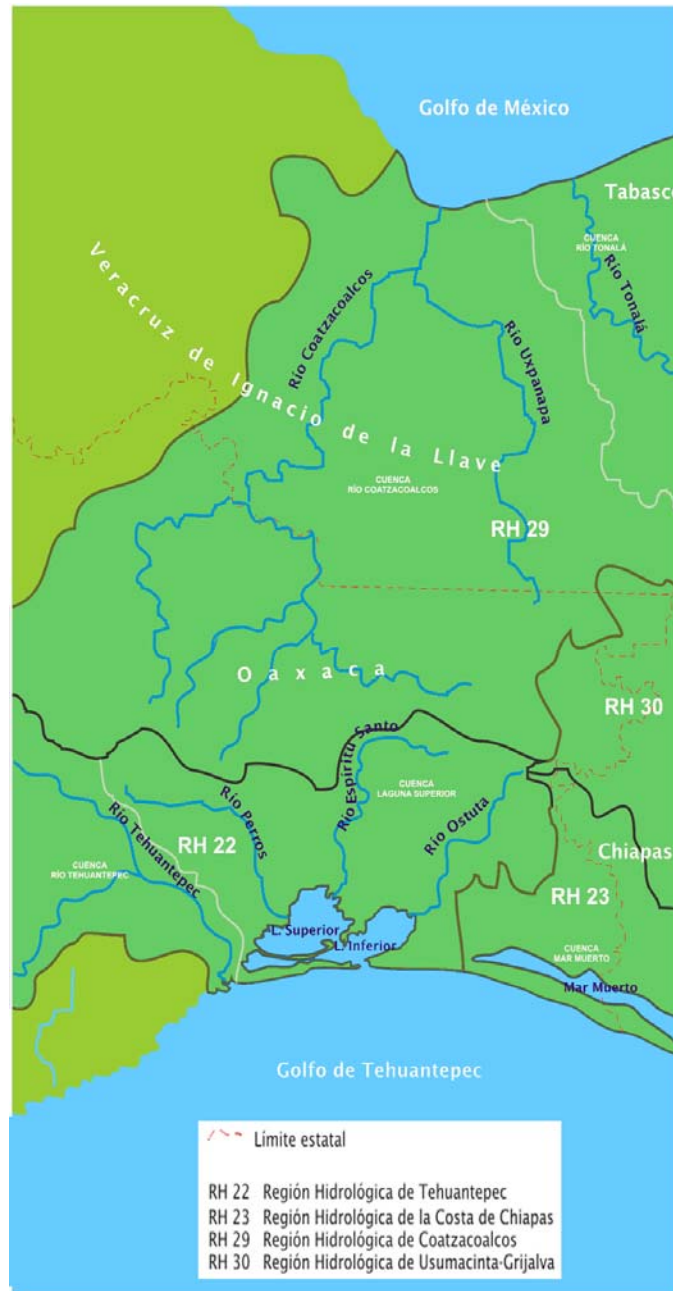


Figura 6.6 Hidrología del Istmo de Tehuantepec.

Fuente: Wikipedia, 2006.

En el oriente del Istmo, la zona de la Sierra Atravesada forma parte de la Región Hidrológica número 30 del Usumacinta - Grijalva, aunque no hay corrientes de agua de importancia en la región. Prácticamente toda la región de las llanuras del Istmo forma parte de la región hidrológica número 22 de Tehuantepec. La región comprende dos cuencas: la del río Tehuantepec, río que nace en la sierra Madre del Sur al noroeste del Istmo; y la de la Laguna Superior. (Wikipedia, 2006)

La cuenca del río Tehuantepec ocupa más de la novena parte de la superficie del estado de Oaxaca. Es decir, más de 10 000 km². El principal río de la cuenca es el Río Tehuantepec, que con una longitud de

240 km desagua 950 Hm³/s en el Golfo de Tehuantepec. Poco antes de su desembocadura recibe las aguas del Río Tequisistlán. En la confluencia de ambas corrientes se localiza la Presa Benito Juárez. Otra cuenca que conforma la región hidrológica número 22 es la de Laguna Superior, que abarca casi toda la región de la llanura ístmica. La Laguna Superior recibe las aguas de pequeños ríos que bajan principalmente de la Sierra Atravesada. Entre ellos están los ríos Perros, Espíritu Santo y Ostuta. La Laguna Superior desemboca en la Laguna Inferior, que a su vez desagua directamente en el Golfo de Tehuantepec. (*Op. Cit.*)

La cuenca del Mar Muerto, de la región hidrológica 23 de la Costa de Chiapas comprende el oriente de la llanura del Istmo de Tehuantepec, en los límites de Oaxaca y Chiapas. Se caracteriza por la presencia de la laguna llamada Mar Muerto, paralela a la costa del Golfo de Tehuantepec. La cuenca de este lago abarca cerca de 900 km² de superficie en el estado de Oaxaca. (*Op. Cit.*)

6.2.5 Demografía

El Istmo de Tehuantepec alberga una población de aproximadamente 1 200 000 habitantes. Sus principales centros de población se localizan en el Golfo de México, y se encuentran asociados a la industria petrolera de la región. En esta zona se encuentran las zonas metropolitanas de Minatitlán, Coatzacoalcos y Acayucan, que por sí mismas albergan alrededor de dos tercios de la población del Istmo. Una amplia zona que comprende la Sierra Atravesada y el extremo sureste de Veracruz es la de menor densidad poblacional. En esa región se localizan poblaciones como Santa María Chimalapa, en Oaxaca, que no rebasan la decena de millar de habitantes. La costa pacífica del Istmo concentra otra proporción importante de la población regional. En ella se localizan Juchitán de Zaragoza, Santo Domingo Tehuantepec y Salina Cruz, en el estado de Oaxaca. (*Op. Cit.*)

La mitad oaxaqueña del Istmo tiene una fuerte presencia indígena. A diferencia de lo que ocurre en otros sitios de México, donde la desertificación en poblados rurales de la población en una constante, en el Istmo de Tehuantepec los zapotecos son mayoría en el núcleo urbano más importante del oriente de Oaxaca, que es Juchitán de Zaragoza. Además de los zapotecos (*binigulaza*), en el Istmo de Tehuantepec habita una comunidad importante de huaves o mareños, en poblados como San Mateo del Mar y de zoques en la región de Los Chimalapas. (*Op. Cit.*)

6.2.6 Economía

La propia geografía del Istmo de Tehuantepec le ha convertido en una zona estratégica para el paso comercial. Posee dos importantes puertos: el de Coatzacoalcos, en el Golfo de México, y el de Salina Cruz, en el Golfo de Tehuantepec. También alberga instalaciones importantes relacionadas con la industria petrolera, como la refinería de Salina Cruz o la de Minatitlán, en el estado de Veracruz. La zona del Istmo de Veracruz posee un importante corredor industrial entre Minatitlán y el puerto de Coatzacoalcos. En el sur, en la parte oaxaqueña, la economía sigue siendo principalmente agrícola y comercial. Juchitán de Zaragoza constituye el principal centro comercial de la llanura meridional del Istmo. Por otro lado, en la Sierra Atravesada y el extremo sureste de Veracruz existen recursos forestales importantes, que son explotados aún cuando se trata de Zonas Naturales Protegidas, como en el caso de la Reserva de la Biósfera de Los Chimalapas.

6.2.7 Transportes

Las principales ciudades del Istmo están comunicadas entre sí por una red de carreteras, casi todas ellas de orden federal. La única autopista que atraviesa la región es la proveniente de México y concluye en el estado de Tabasco. Esta autopista comunica a ciudades como Acayucan y Minatitlán con el centro de la República. De la ciudad de Minatitlán parte un ramal hacia el noreste que une a ésta ciudad con el puerto de Coatzacoalcos. Hacia el sur existe una carretera federal de 308 km de longitud que comunica a Coatzacoalcos con Juchitán de Zaragoza. Tanto esta ciudad como Tehuantepec se comunican con

Oaxaca a través de la Carretera Panamericana, que atraviesa las sierras orientales del estado y prosigue hacia Tapachula, en la frontera de Chiapas y Guatemala. Tehuantepec se comunica al poniente con el centro turístico de Huatulco a través de una carretera federal que corre entre la costa y la Sierra Madre del Sur. Sólo existe un aeropuerto ubicado en la ciudad de Minatitlán. También existen dos puertos marítimos de gran importancia comercial: el Puerto de Salina Cruz en el Océano Pacífico y el Puerto de Coatzacoalcos en el Golfo de México. Una línea ferroviaria comunica ambos puertos atravesando el Istmo de norte a sur, pero evitando la Sierra Atravesada, que es la zona peor comunicada de la región. Cabe mencionar que esta línea de ferrocarriles sólo presta servicio de transporte de mercancías. En la figura 6.7 se muestra la infraestructura de transporte del Istmo de Tehuantepec. (Wikipedia, 2006)

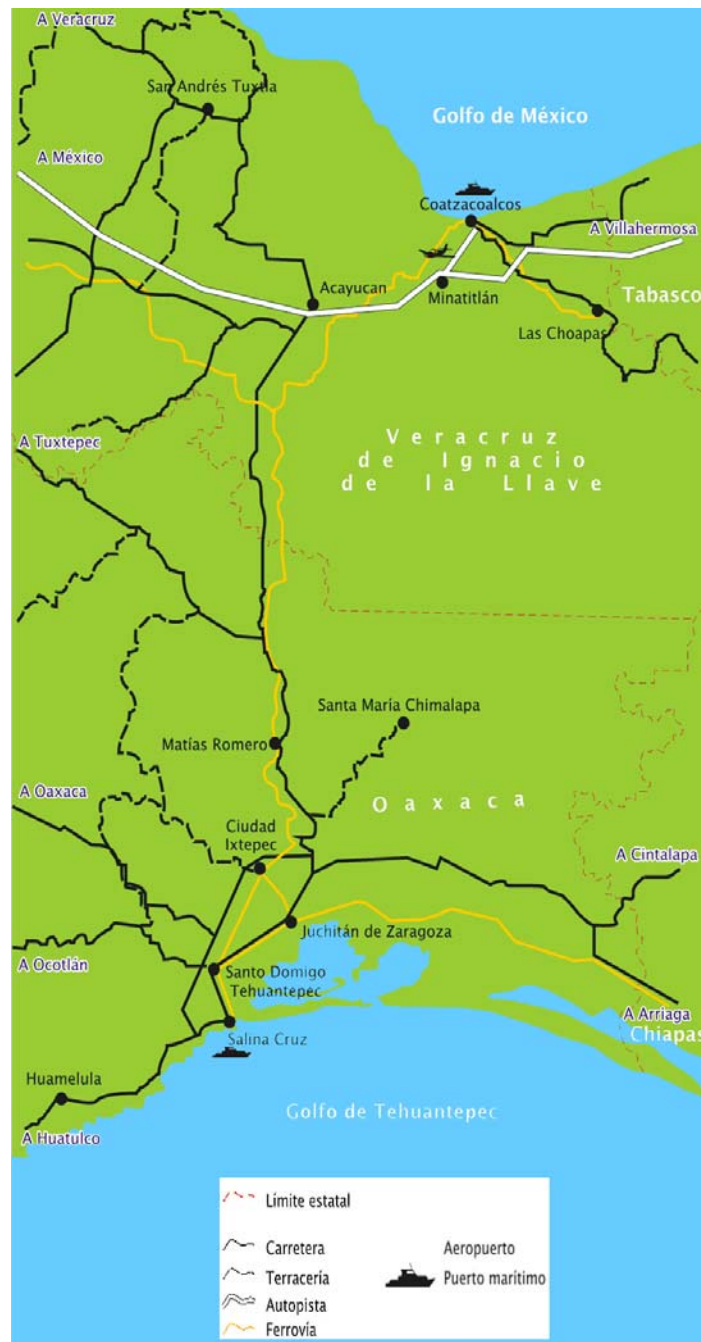


Figura 6.7 Sistemas de transporte en el Istmo de Tehuantepec.

Fuente: Wikipedia, 2006.

6.2.8 Geología

El Istmo de Tehuantepec está repartido entre tres de las quince provincias fisiográficas en que el INEGI ha dividido a la República Mexicana. La parte norte del Istmo corresponde a las subprovincias de la Llanura Costera Veracruzana y de los Pantanos Tabasqueños, ambas correspondientes a la provincia de la Llanura Costera del Golfo Sur. Esta zona se caracteriza por poseer suelos profundos, de origen aluvial, debido sobre todo a la presencia de algunos de los ríos más caudalosos de México, como el río Coatzacoalcos o el Papaloapan. Una pequeña fracción, localizada en el punto donde se unen los límites de los estados de Chiapas, Oaxaca y Veracruz corresponde a la subprovincia de la Sierra del Norte de Chiapas, de la provincia de las Sierras de Chiapas y Guatemala. Esta provincia se extiende hacia Guatemala, y corresponde aproximadamente con la zona que se conoce como Los Altos. Se trata de una zona de serranías bajas, que van elevándose a medida que se recorre hacia el oriente. La mitad sur del Istmo señala el comienzo de la provincia fisiográfica de la Cordillera Centroamericana. Abarca la zona costera del Golfo de Tehuantepec, así como la Llanura del Istmo. La mitad norte del territorio oaxaqueño correspondiente al Istmo de Tehuantepec esta ocupada por la subprovincia de las Sierras del Sur de Chiapas. En otras palabras, es equivalente a la Sierra Atravesada. La subprovincia se prolonga hacia el sureste en el territorio chiapaneco. La mitad sur corresponde a una discontinuidad fisiográfica de las Llanuras del Istmo. La provincia de la Cordillera Centroamericana emergió en el sitio de subducción de la placa de Cocos, y se trata de una serranía de rocas graníticas, aunque la llanura istmeña no corresponde con esta descripción. (Carranza-Edwards, A., 1978; INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, 2005; Wikipedia, 2006)

En general, la superficie del Istmo de Tehuantepec es bastante joven en términos de tiempo geológico. Tanto la Llanura Veracruzana, que penetra hacia el norte de Oaxaca, como la Llanura del Istmo, son terrenos que emergieron durante el período cuaternario. Una parte concentrada en la mitad veracruzana del Istmo de Tehuantepec, corresponde a la unidad de rocas ígneas. La región de la Sierra Atravesada es una representación del período precámbrico de la historia geológica de la Tierra. Predominan las rocas ígneas extrusivas, aunque hay una importante zona con predominio de rocas metamórficas en la región de Los Chimalapas. Zonas más pequeñas de la región corresponden a la era mesozoica, y se localizan en el sitio donde se unen las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur con la Cordillera Centroamericana. (Carranza-Edwards, A., 1978)

La Cuenca Salina del Istmo de Tehuantepec tiene aproximadamente 290 km de longitud y 70 km de ancho. Esta Cuenca ocupa toda la planicie costera que se extiende desde el sureste de Veracruz hasta el noreste de Tabasco, y posiblemente continua hacia el este en dirección de la Península de Yucatán. Se sabe que esta área ha sido formalmente explorada desde el año de 1902. Debido al enorme tamaño de las estructuras salinas (masas salinas que cubren áreas de hasta 2 000 km²) y otras estructuras, se asume que las evaporitas de la cuenca alcanzan espesores de alrededor de 5 000 m. También se asume que la parte superior de las estructuras salinas ascendieron más o menos 3 000 m, y que estas estructuras se formaron originalmente por plegamientos en el periodo Jurásico, para constituirse finalmente como domos salinos por la diferencia de presiones causada por los grandes espesores de los sedimentos del periodo Oligoceno y del Mioceno Inferior. Algunos pozos petroleros profundos, especialmente en las estructuras más productivas, han permitido definir la morfología de la sal con suficiente precisión, tal como se muestra en las figuras 6.8 a 6.11. Cabe resaltar el hecho de que la edad de la sal de la cuenca salina de Veracruz se ha establecido como pre-Kimeridgiano (Castillon y Larios, 1962)

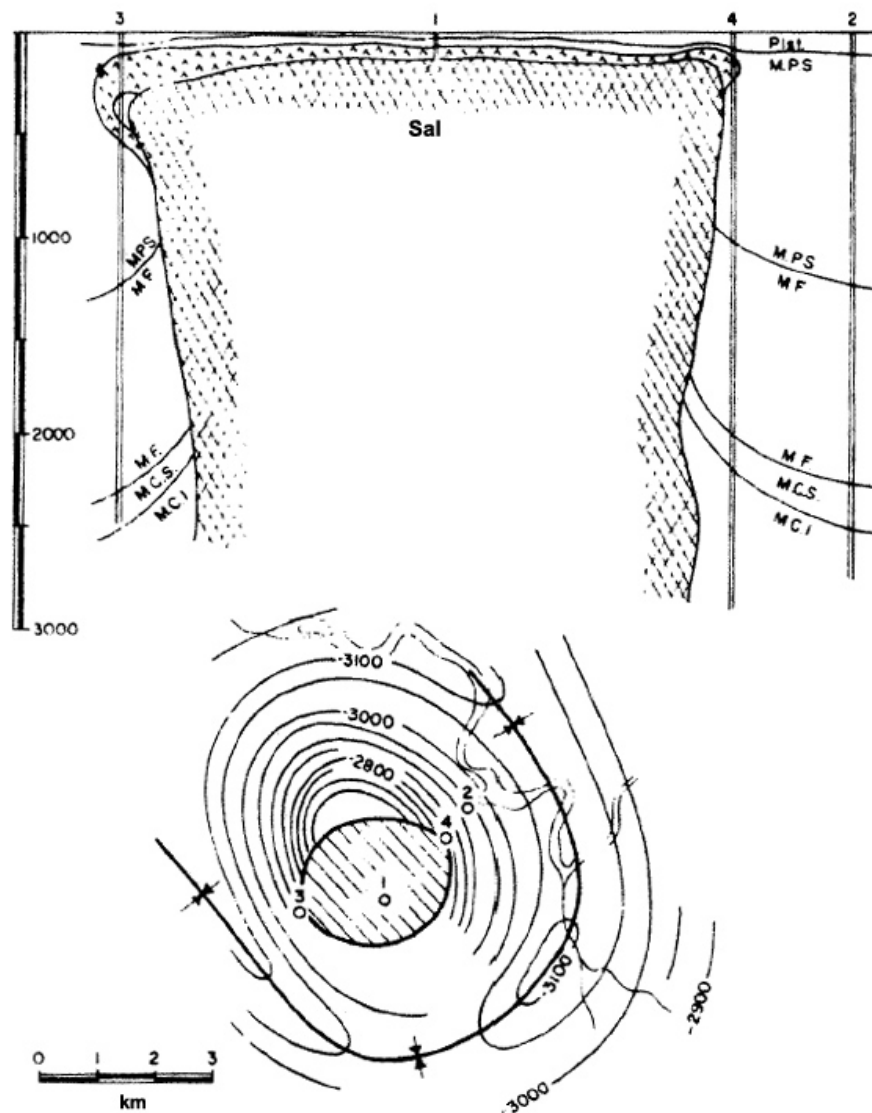


Figura 6.8 Estructura y curvas de nivel del domo salino Zanapa.
 Fuente: Castillon, M. y Larios J. P., 1962.

En la figura anterior se puede apreciar el hecho de que la masa salina se encuentra a una profundidad de aproximadamente 100 m, además de que el espesor de la sal es considerable (más de 1 500 m), lo cual hace que éste domo salino sea un fuerte candidato para funcionar como sitio de disposición de residuos peligrosos líquidos.

En la figura 6.9 se puede apreciar que la profundidad a la cual se puede encontrar la masa salina es muy variable, además de que se tiene la presencia de diversas trayectorias de fallas y/o pliegues geológicos, lo cual hace necesario realizar una caracterización más detallada con la finalidad de indicar si es posible o no el empleo de estos domos salinos para la disposición de residuos peligrosos en su interior.

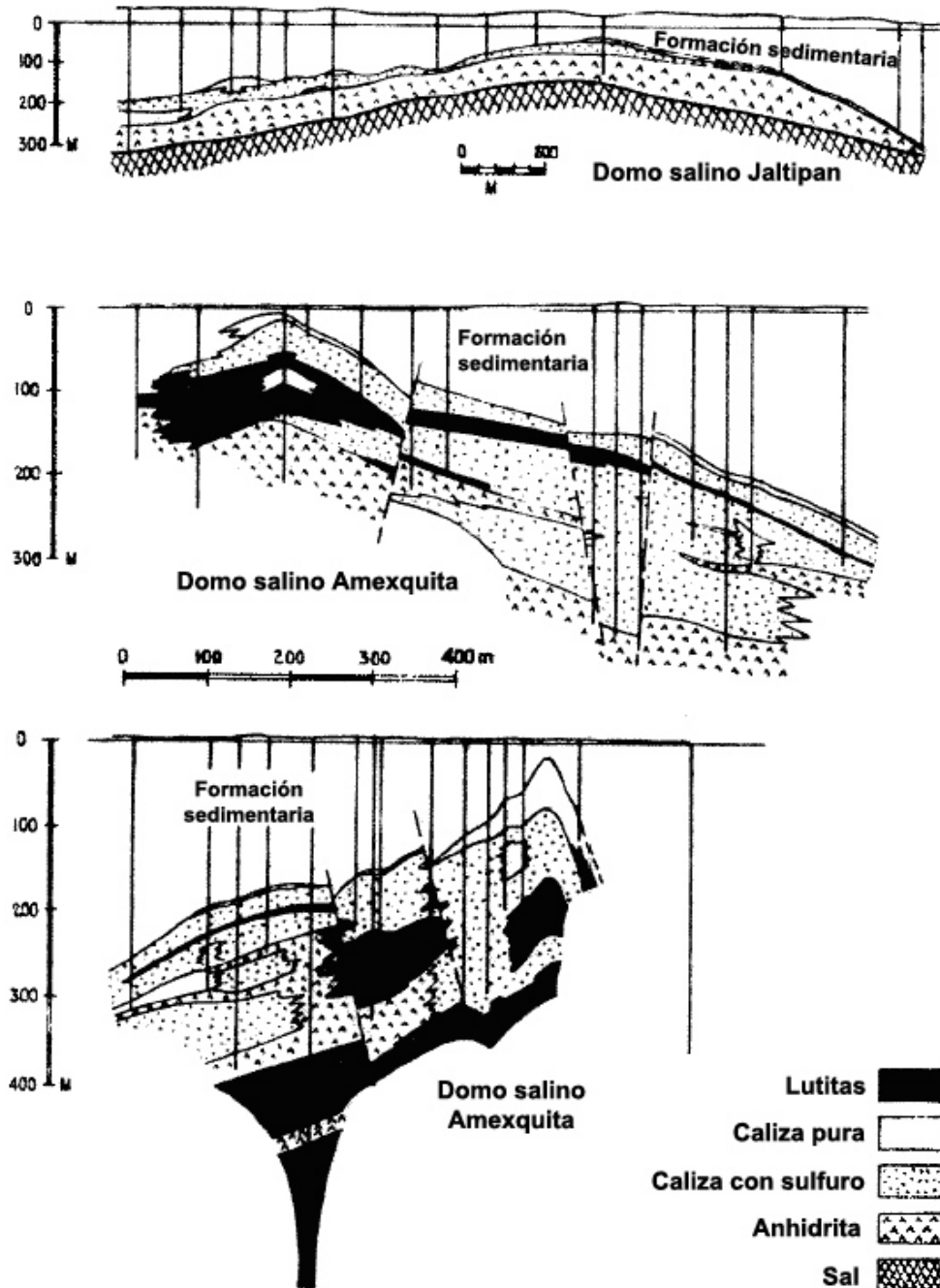


Figura 6.9 Secciones del casquete de los domos salinos Jaltipan y Amexquita.

Fuente: Castillon, M. y Larios J. P., 1962.

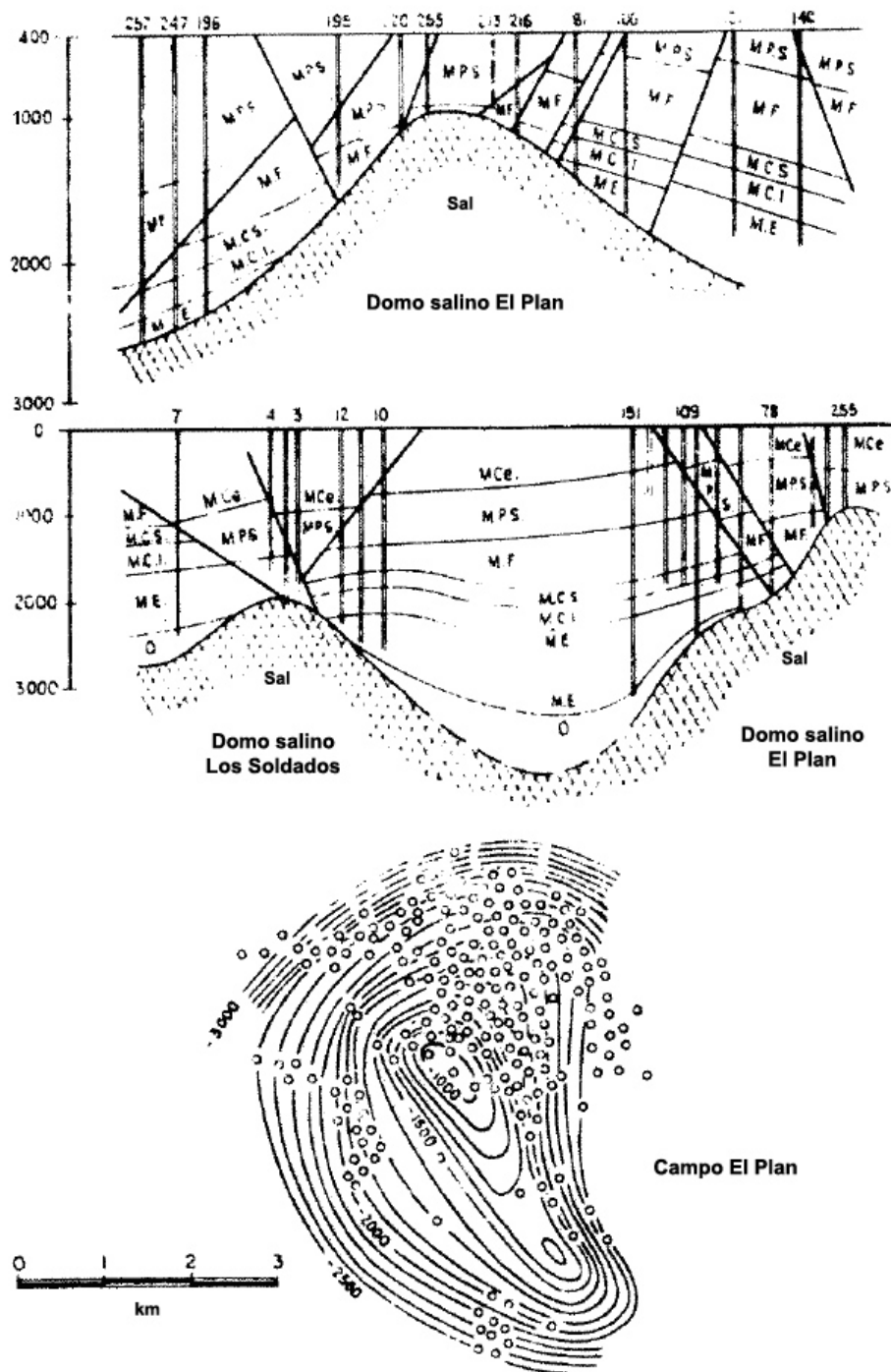


Figura 6.10 Campo de domos salino El Plan.

Fuente: Castillon, M. y Larios J. P., 1962.

De la figura anterior es claramente notorio el hecho de que en algunos casos la profundidad a la cual se encuentra la masa salina puede llegar hasta los 2 000 m de profundidad, además de que puede interconexiones con otros domos salinos, pero que es muy importante tener una caracterización detallada tanto del domo en cuestión, como de los efectos que podría llegar a tener dicha interconexión en el domo de interés.

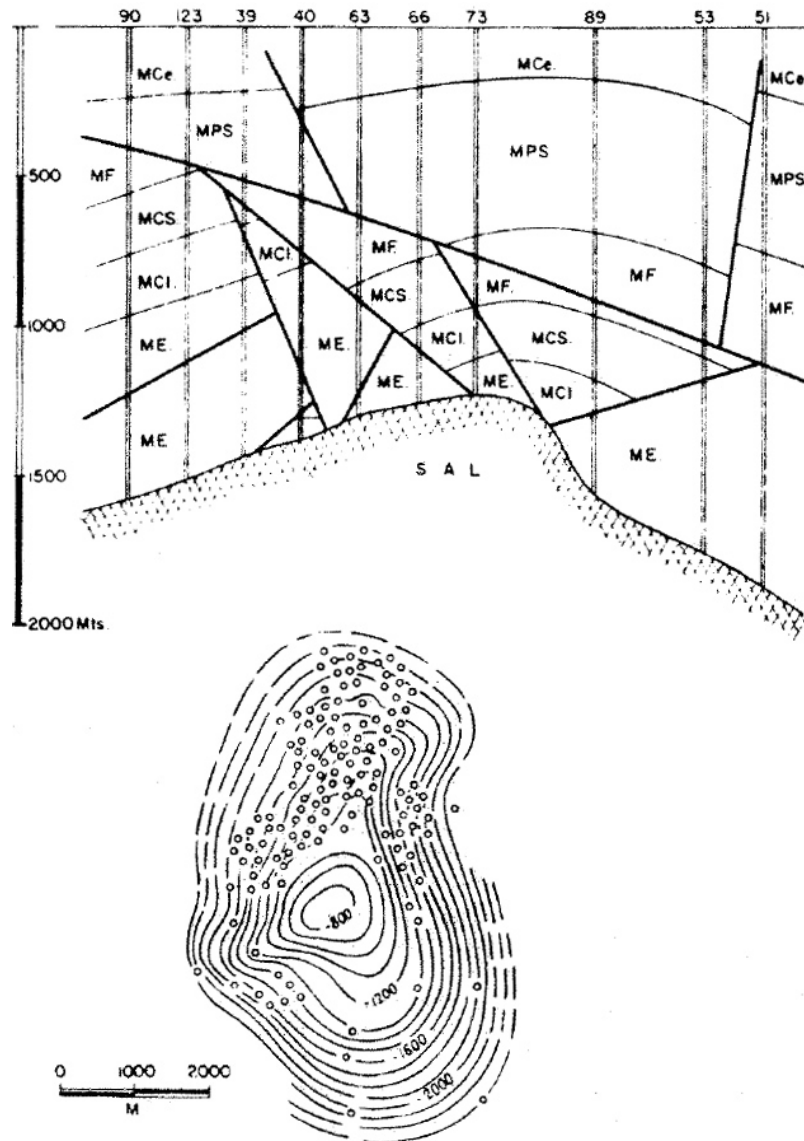


Figura 6.11 Campo de domos salinos La Venta.

Fuente: Castillon, M. y Larios J. P., 1962.

De todas las figuras anteriores (figura 6.8 a 6.11) se observa que la profundidad a la cual se encuentra la parte superior de los domos salinos es variable, y puede estar desde poco menos de 100 m en adelante, por lo que retomando lo establecido en el Capítulo III, en lo relativo a los costos de disposición, dicha profundidad, junto con la composición del domo salino, va a jugar un papel importante en la toma de decisiones para seleccionar el domo adecuado para la disposición final de residuos peligrosos en domos salinos, además de que la presencia de fracturas geológicas cercanas o que atraviesen al domo salino va a tener una importancia considerable debido a las restricciones establecidas por la normatividad aplicable.

6.3 ZONA CON POTENCIAL PARA CONFINAR RESIDUOS PELIGROSOS EN CAVIDADES GEOLÓGICAMENTE ESTABLES

Del análisis de la información presentada, se obtiene que la zona del Istmo Veracruzano es la más adecuada para analizar el potencial de confinamiento de residuos peligrosos en cavidades geológicamente estables, para lo cual es sumamente necesario caracterizar a detalle los domos salinos a emplear.

A partir de las figuras presentadas en este trabajo se puede confirmar lo hasta aquí aseverado, es decir, que la zona del Istmo de Tehuantepec, en especial la porción correspondiente al Istmo Veracruzano, presenta condiciones aptas para ubicar domos salinos que puedan contener residuos peligrosos en su interior.

Debido a que en este trabajo no se pretende caracterizar a detalle a los domos salinos ubicados en el Istmo Veracruzano, además de que tampoco se pretende realizar un proyecto para ubicar algún sitio de confinamiento óptimo, no se ha realizado un análisis exhaustivo de todos los requerimientos establecidos por la normatividad mexicana a fin de localizar el domo o domos salinos aptos para tal objeto.

CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante la información presentada a lo largo de este trabajo se concluye que:

Es factible el empleo de las cavidades construidas por disolución en los domos salinos geológicamente estables en México, como sistema controlado de disposición final de aquellos residuos peligrosos que no disuelvan a la sal generados en el país.

Tanto en los países que integran a la Unión Europea como en México, existe una tendencia en el incremento en la generación de residuos peligrosos, cuyo efecto es cada vez más notorio debido a los graves impactos que éstos tienen sobre el ambiente y la salud del hombre; además de que la infraestructura existente para su manejo, tratamiento y disposición adecuada no es suficiente para satisfacer su demanda actual, aunado a esto se tiene que la disposición de estos residuos presenta un costo tal que los generadores no están dispuestos a solventar.

Los criterios de clasificación empleados en los países miembros de la Unión Europea y los empleados en México presentan diferencias bastante notorias, debido a que un mismo residuo puede ser o no considerado como peligroso en dichos países. De esta forma la Unión Europea ha generado una Lista de Residuos Peligrosos que pretende unificar los criterios de clasificación, lo cual representa el máximo esfuerzo realizado para lograr tal fin.

El empleo de los domos salinos como sitios de disposición de residuos peligrosos se encuentra normado tanto a nivel nacional como internacional, permitiendo el confinamiento únicamente de aquellos residuos que no disuelven a la sal así como de cierto tipo de residuos radiactivos. Los criterios internacionales incluyen variables tales como: la distancia a las áreas donde existan asentamientos humanos, el potencial de migración de los contaminantes a una fuente subterránea de agua potable, la posibilidad de que ocurran inundaciones o terremotos que dañen la integridad del sitio; mientras que los criterios mexicanos toman en cuenta: la presencia de fallas activas cercanas al sitio, la probabilidad de migración de fluidos provenientes de la operación del confinamiento a los acuíferos, la composición mineralógica del domo salino, establece especificaciones hidrológicas y climatológicas innovadoras, además de tomar en cuenta la protección a las áreas ambientalmente sensibles.

Se cuenta con experiencia a nivel mundial y nacional sobre el funcionamiento de los domos salinos, lo cual ha permitido analizar el comportamiento de dichas estructuras durante su ciclo de vida y establecer las principales causas de los accidentes relacionados con el empleo de las cavidades construidas por disolución en este tipo de estructuras geológicamente estables, evitando al máximo cualquier tipo de impacto adverso que dicho sistema pueda tener sobre el ambiente y la salud del hombre.

Los principales modos de falla de la cavidad salina, construida por disolución en el interior de un domo salino, se presentan debido a inestabilidad estructural, filtraciones y por pérdida de volumen. La inestabilidad estructural se puede evitar dejando espesores de roca adecuados para soportar los cambios de esfuerzos en la masa salina. El posible efecto adverso que podría causar el desarrollo de filtraciones en la roca de sal, se ve minimizado si se tiene en cuenta la baja permeabilidad que presenta el mineral halita, lo cual permite que el agua se evapore y se recristalice la sal. La pérdida de volumen originada por la deformación progresiva de la sal, tiene un fuerte impacto desde el punto de vista comercial, ya que este fenómeno reduce el volumen de la cavidad y puede poner en riesgo la estabilidad de la misma; ésta

deformación se puede prevenir evitando concentraciones de esfuerzos en las zonas adyacentes a las paredes de la cavidad salina, impidiendo que se genere una redistribución de esfuerzos en la masa salina de la cavidad. No obstante, estos modos de falla se pueden prevenir si se conocen las características del subsuelo, la composición de la estructura salina y las características del medio que la rodean.

México cuenta con tres formaciones salinas de gran importancia ubicadas en los estados de Veracruz, Tamaulipas y Chihuahua, en las cuales se encuentran estructuras que incluyen a los domos salinos, los cuales podrían funcionar como sitios de disposición de residuos peligrosos generados en el país. Debe tenerse en cuenta que, principalmente en el estado de Veracruz, existen algunos domos salinos que actualmente se encuentran en proceso de explotación de la sal con la finalidad de comercializarla, dejando en su interior cavidades que pueden llegar a emplearse como sitios de confinamiento de residuos peligrosos que no disuelvan a la sal, sin embargo es preciso conocer a detalle todas las características tanto del domo como de la cavidad en cuestión.

Se cuenta con la distribución espacial de los domos salinos ubicados en el estado de Veracruz, los cuales son más susceptibles de llegar a emplearse como sitios de confinamiento de residuos peligrosos debido a las condiciones ambientales, geológicas y humanas presentes en dicho estado, especialmente de la zona conocida como Cuenca Salina. Además de que es en este Estado donde se presenta la mayor parte de la actividad petrolera en el país, por lo que el mercado al cual se atendería sería tal que, muy probablemente, la inversión realizada sería altamente redituable.

Existe poca información acerca de los costos de disposición de residuos peligrosos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables, sin embargo, se establece a manera de aproximación, que el costo de disponer una tonelada de residuos peligrosos en cavidades geológicamente estables varía de 2 dólares a 50 dólares, para aquellos residuos peligrosos generados por la industria petrolera. Sin embargo estas cantidades varían enormemente en relación a la necesidad de contar con instalaciones de estabilización de los residuos peligrosos antes de ser dispuestos, de la profundidad a la cual se vaya a realizar la inyección del residuo, de la composición mineralógica del sitio de disposición y de las características del domo salino, debido a que es de vital importancia contar y controlar la geometría de las cavidades construidas en su interior, con la finalidad de prevenir la falla de la estructura y con ello el desarrollo de los posibles impactos adversos sobre el ambiente y el hombre.

Para el caso específico de México, el costo aproximado que tendría la disposición de una tonelada de residuos peligrosos en cavidades geológicamente estables, construidas por disolución en domos salinos, tendría un costo aproximado de un tercio del que tiene disponerlo en la actualidad en el único confinamiento de residuos peligrosos en funcionamiento en México, el cual se encuentra ubicado en la localidad de Mina en el estado de Nuevo León.

De igual manera se recomienda que:

Se caracterice con el suficiente nivel de detalle el domo o domos salinos a emplear, con la finalidad de que cumpla con la normatividad vigente en la materia y con lo establecido en este trabajo.

Se obtenga la información sobre aquellos domos salinos que ya se encuentren en operación, con la finalidad de determinar si es posible su uso como sitios de disposición final de residuos peligrosos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Agencia Ambiental Europea (2005). Waste quantities by countries, European Topic Center on Resource and Waste Management. Topic Center of European Environment Agency. Página Web disponible en: http://waste.eionet.eu.int/wastebase/quantities/index_html
2. Agencia Ambiental de la República de Eslovenia (2006). Waste management database, Environmental Agency of the Republic of Slovenia, disponible en Web: http://eionet-si.arso.gov.si/kazalci/index_html?tabela=1&lang=1&Kaz_id=39&Kaz_naziv=Nastajanje%20nevarnih%20odpadkov&Sku_id=5&Sku_naziv=ODPADKI%20IN%20SNOVNI%20TOK&tip_kaz=1#KAZALEC_TOP
3. Agencia de Protección al Ambiente – Irlanda (2001). Hazardous waste statistics, National Hazardous Waste Management Plan, 26 p., junio 15, disponible en Web: <http://www.epa.ie/OurEnvironment/Waste/HazardousWasteManagement/PDFsforNHWM/Upload,8882,en.pdf>
4. Allen, K. (1972). Eminence Dome - Natural gas storage in salt comes of age, J. Pet. Tech., November.
5. Allison, M. L. (2001). Hutchinson, Kansas: a geological detective story. *Geotimes*, Web site: www.agiweb.org
6. Aparicio, F. J. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie, Limusa Noriega Editores, 303 p.
7. Aparicio, J. A. (2004). Planificación - inundaciones, marzo 2004. Disponible en Web: <http://www.proteccioncivil-andalucia.org/Planificacion/PlanInund.htm>
8. Baar, C. A. (1977). Applied salt rock mechanics, 1, Elsevier.
9. Bays, C. A. (1963). Use of salt solution cavities for underground storage, Symposium on Salt, Northern Ohio Geol Soc.
10. Bell, F. G. (1981). *Geotechnical properties of evaporities*, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 24, pp. 137-144.
11. Bell, F. G. (1994). A survey of the engineering properties of some anhydrite and gypsum from the north and midlands of England. *Engineering Geology*, No. 38, pp. 1-23.
12. Bell, F. G., (1998). Environmental geology principles and practice, Blackwell Science Ltd., 594 p.
13. Bérest, P. and Brouard, B. (2003). *Safety of salt caverns used for underground storage, blow out; mechanical instability; seepage; cavern abandonment*, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Éditions Technip, Vol. 58, No. 3, pp. 361-384.
14. Bishop, W. M. (1991). Storage of grain in solution mined caverns, SMRI Fall Mtg.
15. Blecker, J.; Foltas, F. and Rolleke, F. J. (1994). Conversion of oil caverns to gas storage at the Etzel Salt Dome, SMRI Fall Mtg., 23.
16. Botello A. V., Ponce G., Toledo A., Díaz G., Villanueva S. (1992). *Ecología, recursos costeros y contaminación en el Golfo de México*, Revista Ciencia y Desarrollo, número 17, pp. 28-48.

17. Botello, A. V., González C., y Díaz G. (1991). *Pollution by petroleum hydrocarbons in sediments from continent shelf of Tabasco State, Mexico*. Bull Environmental Contamination Toxicology, número 47, pp. 565- 571.
18. Boucly, P. (1984). In situ experience and mathematical representation of the behavior of rock salt used in storage of gas, The Mech. Behavior of Salt, Hardy and Langer (eds.), Trans Tech, 453.
19. Branyan, S. (1963). Operation and maintenance of underground storage, 1st Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, USA.
20. Brassow, C. and Thoms, R. (2000). Use of solution - mined salt caverns for disposal of hazardous and industrial waste product. Proceeding of 8th Salt Symposium, Elsevier.
21. Brodersen J., *et al.* (2001). Hazardous waste generation in EEA Member Countries, Comparability of classification systems and quantities. Topic report No. 14/2001. Agencia Europea del Ambiente, Copenhagen, 118 p.
22. Carranza-Edwards, A. (1978). Ambientes sedimentarios recientes de la llanura costera sur del Istmo de Tehuantepec. Memorias del VI Congreso Nacional de de Oceanografía. 10 al 13 de abril. Ensenada, BC. En: Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología. Disponible en Web: <http://biblioweb.dgsca.unam.mx/cienciasdelmar/centro/1980-2/articulo93.html>
23. Cashman, K. V.; Sturtevant, B.; Papale, P. and Navon, O. (2000). *Magmatic fragmentation*. En: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. *et al* editors. Academic Press, San Diego, pp: 421-430.
24. Castillon M. y Larios J. P. (1962). Salt deposits of the Isthmas of Tehuantepec, Salt Institute. Proceedings of 1st. Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, USA. Section I – Geology, pp. 263 – 280.
25. CENAPRED (2001a). Diagnostico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México, Sistema Nacional de Protección Civil, Secretaría de Gobernación; Talleres Gráficos de México, diciembre 2001, 225 p.
26. CENAPRED (2001b). Sismos, Serie Fascículos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, 4ta. Edición. México, 36p.
27. CENAPRED (2004). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Serie: Atlas Nacional de Riesgos. México.
28. Centro de Información Ambiental de Estonia (2001). Estado del ambiente en Estonia en el umbral del siglo XXI, Tallin, Estonia.
29. CIESAS (2005). El plan integral del Istmo de Tehuantepec: ¿Un proyecto postergado?, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Unidad Golfo. Xalapa, Veracruz, México. Disponible en Web: <http://www.ciesas-golfo.edu.mx/istmo/docs/propuestasrecientes/proprec1.htm>
30. Código Federal de Regulaciones (2005). CFR 40, Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos de Norteamérica – US EPA. Disponible en Web: <http://www.epa.gov>
31. Comisión Europea (2002a). 2002 Regular report on Estonia's progress towards accession, SEC (2002) 1402, octubre de 2002, 144 p. Bruselas, Bélgica.
32. Comisión Europea (2002b). 2002 Regular report on Poland's progression towards accession, European Commission, SEC (2002) 1408, octubre de 2002, 162 p. Bruselas, Bélgica.
33. Comisión Europea (2002c). 2002 Regular report on Slovakia's progress towards accession, SEC (2002) 1410, octubre de 2002, 149 p. Bruselas, Bélgica.
34. Comisión Europea (2002d). 2002 Regular report on Slovenia's progress towards accession, SEC (2002) 1411, octubre de 2002, 139 p. Bruselas, Bélgica.
35. Comunidad Europea (2004). Gestión de los residuos industriales y peligrosos en los países adheridos. Tema 8: Ambiente y Energía. Comunidad Europea, Eurostat. 81 p.

36. Comisión Europea (2005). Enlargement DG, European Commission, consultado en agosto de 2005, disponible en Web: <http://europa.eu.int/comm/enlargement/poland/index.htm>
37. Consejo Coordinador Empresarial - Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A. C. (1998). *Residuos industriales peligrosos en México: políticas, inversiones e infraestructura*, No. 6, Abril de 1998. México.
38. Chacón A., D. (2004). Política nacional de los residuos peligrosos, simposio Reunión Nacional de Protección Ambiental, PEMEX Exploración y Producción, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, SEMARNAT-Dirección General para la Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, 25 y 26 de noviembre de 2004. México, D. F.
39. Chilingarian, G. V., J. O. Robertson, Jr. y Kumar, S. (1989). *Surface operations in petroleum production*, II, Elsevier, New York.
40. CHOIKE (2005). En *profundidad: tráfico de residuos peligrosos*, Instituto del Tercer Mundo, Uruguay. Consultado en septiembre de 2005. Disponible en Web: <http://www.choike.org/nuevo/informes/1081.html>
41. Davidson, B.; Dusseault, M. B. and Lemieux, B. (1997). An examination of issues related to disposal of toxic industrial wastes, SMRI Fall Mtg.
42. Deere, D. U.; Hendron, A. J.; Patton, F. D. and Cording, E. J. (1967). Design of surface and near surface construction in rock: Minneapolis, MN. Proceedings of 8th. Symposium on Rock Mechanics. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 237 - 302.
43. DGGIMAR (2005). Dirección General para la Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Página Web, disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/dgmic/index.shtml>
44. Díaz-Barriga, F, Santos M. A., Yáñez L., Cuéllar J. A., Gómez H., García A. *et al.* (1993). Biological monitoring of workers at a recently opened hazardous waste disposal site. *J Exp. Anal Environmental Epidemiology*, número 3, pp. 63-71.
45. Díaz-Barriga, F. (2001). *Los residuos peligrosos en México. Evaluación del riesgo para la salud*, Salud Pública, México, agosto de 2001, número 38, pp. 280-291. Disponible en Web: <http://www.insp.mx/salud/38/384-8.html>
46. DOE (1980), U.S. Department of Energy. OSC Strategic petroleum West Hackberry oil storage cavern fire and spill after action, Report, I.
47. Eargle, D. H. and Herbst, E. L. (1970). Regional geology and the Salmon event, *Geol-Tech. Gulf Coast Salt*, Kupfer (ed.) Sch. GeoSci., LSU, 87.
48. EUROSTAT (2000). Waste generated in Europe, data 1985-1997, Comisión Europea, Luxemburgo, 37 p.
49. Fernández D., G. (2001). Almacenamientos subterráneos en yacimientos salinos, 4ta. Conferencia magistral "Profesor Raúl J. Marsal", Cuadernos Fundación ICA, número 38, México.
50. Forum Ambiental Báltico (2000). Second Baltic state of the environment report, based on environmental indicators. Baltic Environmental Forum, Riga, Letonia, noviembre de 2000.
51. Furiga, R. D. and Smith, R. E. (1983). The development of the strategic petroleum reserve of the USA. *Annales des Mines*, 5-6, 47-62.
52. Gas Processors Association (1997). North American storage capacity, U.S. Import/Export Terminals for Light Hydrocarbons, Tulsa OK.
53. Gebhardt, F.; Eby, D. and Barnette, D. (2001). Utilizing coiled tubing technology to control a liquid propane storage well fire, A case history. *Proceeding of SMRI Spring Meeting*, Orlando, 301-308.
54. Gentry, H. L. (1963). Storage of high pressure natural gas in underground salt or rock caverns, 1st Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, USA.

-
55. Gobierno de la República de Eslovenia (2003). Reporte del estado del ambiente 2002, Ministerio del Ambiente, Planeación Espacial y Energía. República de Eslovenia. Ljubljana, 112 p.
 56. Griffiths, M. and Woynillowicz, D. (2003). Oil and troubled waters, Reducing the impact of the oil and gas industry on Alberta's water resources, Pembina Institute for Appropriate Development, April 2003. Canada.
 57. Grove, T. (2000). Origin of magmas. En: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. *et al* editors. Academic Press, San Diego, pp: 133-147.
 58. Gutiérrez, C.; Millar, S.; Montoya, C. y Tapia, R. (1991). Diagnóstico de peligro sísmico para la República Mexicana y evaluación de intensidades para sismos históricos. Informe RG/02/91, CENAPRED.
 59. Haddenhorst, H. G.; Lorenzen, H. and Schwier, K. (1977). Studies on storage of LNG in salt cavities, 5th I. Conf. Liquefied Natural Gas, Institute of Gas Technology, Chicago II., 8.
 60. Halbouty, M. T. (1979). Salt domes, Gulf Region, United States and Mexico, 2nd Ed., Gulf Pub. Co., Houston.
 61. Hanson, B. (1999). *Black Gold beneath the Bayous, reservoir traps*. Louisiana State University, Louisiana Department of Natural Resources, CD-ROM.
 62. Hasan, S. E. (1995). Geology and hazardous waste management, editorial Prentice Hall, New Jersey, USA, 287 pp.
 63. Hatheway, A. W. (1990). *Rock quality designation (RQD: a wonderful shortcut): AEG News*. Vol. 33, number 4, p. 28 - 30.
 64. Hellberg, C. and Iversen, E. U. (1994). Construction of natural gas stores in salt formations with high insoluble fractions, Cavern Keil 102, SMRI Fall Mtg., 309.
 65. Herbert, E. A. (1996). *The regulation of deep-well injection: a changing environment beneath the surface*. Pace Environmental Law Review, Vol. 14, No. 1, Fall 1996, Pace Law School, N. Y., USA. Disponible en Web: <http://www.pace.edu/lawschool/pelr/vol14no1f1996/herbert.html>
 66. Hoather, H. A. and Challinor, D. (1994). The use of salt cavities for the disposal of waste, SMRI Fall Mtg. 325.
 67. IMP (2006). Sitio Web del Instituto Mexicano del Petróleo. Disponible en: <http://www.imp.mx/>
 68. INEGI (2006a). Sitio Web del INEGI. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.asp>
 69. INEGI (2006b). Comunicado número 116/06, 24 de mayo de 2006, Veracruz de Ignacio de la Llave.
 70. INEGI. Anuario de estadísticas por entidad federativa (2005). Veracruz de Ignacio de la Llave. México, 2005.
 71. INEGI. Carta geológica de la República Mexicana, escala 1:1 000 000. Edición digital en CD – ROM.
 72. INEGI. Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:1 000 000.
 73. INEGI. Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000.
 74. INEGI. Carta fisiográfica, escala 1:1 000 000.
 75. INEGI. Carta hidrológica de aguas subterráneas de la República Mexicana, escala 1:1 000 000. Edición digital en CD – ROM.
 76. INEGI. Carta hidrológica de aguas superficiales, escala 1:1 000 000.
 77. INEGI. Carta hidrológica de aguas superficiales, escala 1:250 000.
 78. INEGI. Carta topográfica, escala 1:50 000.
-

-
79. INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta de climas, escala 1:1 000 000.
 80. INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta edafológica, escala 1:250 000.
 81. INEGI. Conjunto de datos geográficos de la carta geológica, escala 1:250 000.
 82. Instituto Francés del Ambiente (1999). The environment in France. Edición publicada por L'Institut Français de l'Environnement (IFEN), Orleáns, Francia, 304 p.
 83. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2005). Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Disponible en Web: <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/veracruz/pres.htm>
 84. Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia, 613 p.
 85. Katz, D. L. and Lee, R. L. (1990). Natural gas engineering, production and storage, McGraw-Hill.
 86. Koenig, J. W. (1994). Preparing motor gasoline for salt cavern storage of up to 10 years, Solution Mining Research Institute (SMRI) Fall Mtg., 425.
 87. Kostick, D. S. (1992). The world salt industry: A heritage of progress for the 21st century, Seventh Symposium on Salt, Elsevier I, 21.
 88. Langer, M. (1982). *Geotechnical investigation methods for rock salt*, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 25, pp. 155-164.
 89. Legget, R. F. y Karrow, P. F. (1986). Geología aplicada a la Ingeniería Civil, 3ra. Edición, McGraw Hill, México, pp 3.1 - 4.20.
 90. Leith, W. (2001). Geologic and engineering constraints on the feasibility of clandestine nuclear testing by decoupling in large underground cavities. US Geological Survey, January 2001, USA.
 91. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (1999), 17ª edición, editorial Porrúa, México, 1999.
 92. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003). Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003, México D. F., México.
 93. Linn, J. K. and Culbert, J. (1999). *Experience in underground storage of crude oil in salt*, Sp. Pub. 90, Geo-Inst. ASCE, 810.
 94. Lolan, W. E.; Valadie, R. J. and Ballou, P. J. (1998). Remote operated vehicle design, cavern survey and gel plugging to repair LOOP cavern 14, SMRI Fall Mtg., 327.
 95. López D., González D., y Moreno A. R. (1987). Cromo. La salud ambiental en México. México DF. México. Universo Veintiuno, pp. 139-140.
 96. López R., E. (1979). Geología general de México. Volumen III, 2da. Edición, 446 pp.
 97. López R., E. (1983). Geología general, Tomo I, 6ta. Edición, 357 p. México.
 98. Maniatoba Hazardous Waste Management Corporation (1988); Temple, Baker & Slo Ltd. (1897). Publicado en "Environmental impact assessment for waste treatment and disposal facilities"; Petts, J. and Eduljee, G.; John Wiley and Sons, 1994.
 99. Mapas de México (2006). Sitio Web disponible en: www.map-of-mexico.co.uk/espanola/mapa-de-veracruz.htm
 100. Martínez, S. I. (2000). Introducción a la hidrología superficial, Textos Universitarios, Ciencias Tecnológicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 327 p.
-

101. Matos V. (2002). *Residuos industriales en el mundo*, número 8, marzo-mayo de 2002, Revista Ambios, Montevideo - Uruguay. Versión electrónica disponible en Web: <http://www.erres.org.uy/noti0502.htm>
102. McCauley, T. V.; Ratigan, J. L. and Sydansk, R. D. (1998). Characterization of the brine loss zone and development of a polymer gel plugging agent to repair LOOP cavern 14, SMRI Fall Mtg., 391.
103. Meyers, A. J. (1963). Sonar measurements of brine cavity shapes, 1st Symposium on Salt, Section III, Cleveland, Ohio, USA.
104. Ministerio del Ambiente de la República Checa (2001). Report on the environment in the Czech Republic in 2000, diciembre 2001, 189 p. Disponible en Web: http://www.env.cebin.cz/publikace/3_zprava2000_e/aobsah_p.htm
105. Ministerio del Ambiente de la República de Eslovaquia (2002). Waste management programme of the Slovak Republic until 2005, Ministry of the Environment, Bratislava.
106. Ministerio del Ambiente de la República de Lituania (2001). Environment 2000, State of the environment, main change trends and protection measures. Vilnius, Lituania.
107. Ministerio del Ambiente y Planeación Espacial de Eslovenia (1999). National environmental action programme (NEAP), Administración para la protección de la naturaleza. Ljubljana, Eslovenia, septiembre de 1999, 102 p.
108. Moirer, B. M. (1992). Salt in Europe: historical aspects and economic outlook, Seventh Symposium on Salt, Elsevier I, 29.
109. NOM-052-SEMARNAT-2005. Norma Oficial Mexicana que establece las características de los residuos peligrosos, listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
110. NOM-053-SEMARNAT-2005. Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
111. NOM-054-SEMARNAT-1993. Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-2005.
112. NOM-055-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radiactivos.
113. NOM-056-SEMARNAT-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.
114. NOM-057-SEMARNAT-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.
115. NOM-058-SEMARNAT-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.
116. NOM-145-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana relativa al confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables.
117. Noticieros Televisa (2005). *Fuera de control 50% de residuos peligrosos en México: SEMARNAT*, reportera Guadalupe Flores, entrevista a José Luis Luege Tamargo, Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 3 de agosto de 2005, disponible en Web: <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/465150.html>

-
118. NTSB (1993). National transportation safety board. Highly volatile liquids release from underground storage cavern and explosion, Mapco Natural Gas Liquids Inc., Brenham Texas, April 7, 1992, *NTSB/PAR-93/01, PB93-916502*.
 119. OECD (1997). Compendio de datos ambientales de la OECD. OECD, Paris, Francia, septiembre de 1997, 288 p.
 120. OECD (2003). OECD Environmental performance reviews Poland, OECD Paris, junio 2003, 216 p.
 121. Ortíz F., Cortinas C. y Maffey M. L. (1987). *Manejo de los desechos industriales peligrosos en México*, México, revista Universo Veintiuno, número 123, pp. 142-143.
 122. Periódico El Norte (1992). *Contaminan la Huasteca*. Alvarado J. M., 11 de enero de 1992; sección B, página 1.
 123. Periódico El Sol de México (2005). *Invertirán en PEMEX casi 177 mdp para almacenar petróleo*, reportero Jorge Olmedo, México, D. F., 5 de diciembre de 2005. Disponible en Web: <http://www.elsoldemexico.com.mx/impreso/050122/finanzas/3finanzas.asp>
 124. Periódico El Universal Online (2001). *Sener: puede IP invertir en almacenamiento de gas LP*, reportero José Kermith Zapata, 3 de julio de 2001, sección de finanzas. Disponible en Web: http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/web_histo_finanzas.despliega?var=17807&var_sub_ac_tual=s&var_fecha=03-JUL-01
 125. Periódico La Jornada (1992). *Hallan depósito clandestino de desechos tóxicos en Ciudad Juárez*, 16 de abril de 1992, pp. 7.
 126. Periódico La Jornada (1994). *Bases para una política nacional de residuos peligrosos*. Instituto Nacional de Ecología, diciembre de 1994, pp. 26-28.
 127. Periódico La Jornada (2005). Reportera Laura Poy Solano, 14 de septiembre de 2005.
 128. Periódico Reforma (2006). *Sangre a la alcantarilla*, fecha: 13 de marzo de 2006. México, D. F., sección Estados.
 129. Pfeifle, T. W., T. J. Vogt, and G. A. Brekken (1995). Correlation of chemical, mineralogic, and physical characteristics of Gulf coast dome salt to deformation and strength properties. Solution Mining Research Institute Research Project Report 94-0004-S, January.
 130. Price, M. (2003). *Agua subterránea*, Limusa Noriega Editores, 1ra. edición, 330 p.
 131. PSM (1996). *Mapas de peligro sísmico en México*. Programa elaborado por el Instituto de Ingeniería - UNAM, CENAPRED, CFE y el IIE. México D.F., 1996.
 132. Reglamento en materia de Residuos Peligrosos de la LGEEPA - Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 17ª edición, editorial Porrúa, México, 1999.
 133. Remson, D. R.; Dommers, O. B. and Jessen, F. W. (1967). Techniques for developing predetermined shaped cavities in solution mining, 2nd. Symposium on Salt, Cleveland, USA.
 134. Rezunenkov, V. I. and Smirnov, V. I. (1994). Rock salt underground storages, SMRI Fall Mtg., 581.
 135. Rezunenkov, V.; Smirnov, V.; Fedorov, B.; Jadovets, Y.; Chernychova, V. and Jilenko, E. (1999). Salt caverns for helium concentrate storage, SMRI Fall Mtg., P.
 136. Rivero S., O. *et al.* (1996). Los residuos peligrosos en México, Programa Universitario del Medio Ambiente, Universidad Nacional Autónoma de México.
 137. Rolfs, O.; Schmidt, U. and Crotochino, F. (1992). Rock mechanical studies on the post operational phase of a disposal cavern, SMRI Fall Mtg.
 138. Rumania (2002). National strategy for waste management in Romania, Mayo de 2002, 219 p. Disponible en Web: <http://www.unece.org/env/epr/studies/romania/welcome.htm>
-

-
139. Salt Institute (2005). Major salt deposits and dry salt production sites in North America, disponible en Web: <http://www.saltinstitute.org>, consultado el 10 de diciembre de 2005.
 140. Schalge, R. and Swartz, W. (1998). Chilling natural gas to increase salt cavern storage capacity, SMRI Fall Mtg., 417.
 141. Schlumberger (2005). Oilfield glossary, domos salinos, disponible en Web <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=salt%20dome>, consultado el 10 de diciembre de 2005.
 142. Secretaría de Energía (2005). Petróleo. México. Última actualización: 13 de julio de 2005. Disponible en Web: http://www.energia.gob.mx/wb2/Sener/Sene_179_petroleo
 143. SEDESOL (1993). Secretaría de Desarrollo Social. *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992*. México, D. F., SEDESOL, pp. 193-206.
 144. SEDUE (1986). Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Informe sobre el estado del medio ambiente en México*. México, D. F., SEDUE, pp. 50.
 145. SEMARNAT (2002). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Contaminación del suelo, SEMARNAT - Contaminación, México, Dirección General de Estadística e Información Ambiental, disponible en Web: http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_2000/informe_2000/03_Suelos/3.5_Contaminacion/index.shtml
 146. SEMARNAT (2003a). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Compendio de Estadísticas Ambientales 2002*. México, D. F., SEMARNAT, 275 p.
 147. SEMARNAT (2003b). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Generadores de residuos peligrosos*, Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, agosto 21 de 2003, México, D. F. Disponible en Web: <http://www.semarnat.gob.mx/dgmic/rpaar/rp/volumen/volumen.shtml>
 148. SEMARNAT (2005). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Empresas que manifiestan la generación de residuos peligrosos y volumen generado por entidad federativa, 1999 y 2000*, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes. México, D. F.
 149. Shock, D. A. (1967). Use of hydraulic fracturing to make a horizontal storage cavity in salt, 2nd. Symposium on Salt. Cleveland, USA.
 150. Short, N. M. (2006). Remote sensing tutorial, NASA, USA. Last Updated: February 1st, 2006. Disponible en Web: http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect2/Sect2_1a.html
 151. Solution Mining Research Institute (2005). Gulf coast salt domes and salt caverns, USA. Disponible en Web: <http://www.solutionmining.org/smri.cfm?a=cms,c,11,1>, consultado el 9 de diciembre de 2005.
 152. Tarbuck, E. y Lutgens, F. (1999). Ciencias de la tierra: una introducción a la Geología Física. 6ta. Edición. Prentice Hall Iberia S. R. L. Madrid. 572 p.
 153. Teorema Ambiental (2005). *Mal confinamiento de residuos peligrosos en México*, José Luis Luege Tamargo, secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales, número 53, agosto de 2005.
 154. Testa, S. A. (1994). Geological aspects of hazardous waste management, CRC Press, Boca Raton, Florida, 537 p.
 155. Thiel, W. R. (1993). Precision methods for testing the integrity of solution mined underground storage caverns, Proceeding of Seventh, Symposium On Salt , Elsevier I, 377.
 156. Thoms, R. L. and Gehle, R. M. (1994). Analysis of a solidified waste disposal cavern in Gulf coast salt dome, SMRI Fall Mtg., 637.
-

-
157. Thoms, R. L. and Gehle, R. M. (2000). A brief history of salt cavern use. Proceeding of 8th Salt Symposium, Salt Extraction. Elsevier, volumen 1. Hague, The Netherlands, May 2000.
 158. Tomasko, D. (1985). A numerical model for predicting the thermal behavior of caverns in the Strategic Petroleum Reserve. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, the University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
 159. Tomasko, D.; Elcock, D.; Veil, J.; Caudle, D. (1997). Risk analyses for disposing non hazardous oil field wastes in salt caverns, prepared for U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, December 1997.
 160. UN - ECE (2001). United Nations Economic Commission for Europe, *Environmental performance review of Romania*, Committee on Environmental Policy, Review Series No. 13, September 2001, Geneva, Suiza, 219 p.
 161. Universidad Veracruzana (2006). sitio Web. Disponible en: <http://www.uv.mx/universidad/infgral/campus/index.html>
 162. Vance, T. B. (1963). Southeastern Michigan Gas Company's high pressure gas holder in a salt stratum, 1st Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, USA.
 163. Veil, J. A. (1997). Costs for off-site disposal of nonhazardous oil field wastes: salt caverns versus other disposal methods. Argonne National Laboratory, Environmental Assessment Division, Prepared for U.S. Department of Energy, April 1997.
 164. Veil, J.; Elcock, D.; Raivel, M.; Caudle, D.; Ayers, R. C. Jr. and Grunewald, B. (1996). Preliminary technical and legal evaluation of disposing of nonhazardous oil field waste into salt caverns, Prepared for U. S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, prepared by Argonne National Laboratory, W-31-109-ENG- 38. Washington, D. C., June 1996.
 165. Veil, J.; Smith, K.; Tomasko, D.; Elcock, D.; Williams, G. and Blunt, D. (1998). Disposal of NORM contaminated oil field wastes in salt caverns - Legal, economic, and risk issues. SMRI, Spring Mtg., 346.
 166. Veracruz (2001). sitio Web. Disponible en Web: http://www.veracruz.com.mx/vera_climas.html
 167. Viessman, W. Jr.; Lewis, G. L. and Knapp, J. W. (1989). Introduction to hydrology, 3rd. edition, Harper Collins Publishers, 780 p.
 168. Ward, A. D. and Trimble, S. W. (2004). Environmental hydrology, 2nd edition, Lewis Publishers, 475 p.
 169. Werner, M. L. (1986). Structure and mineralization of the Richton Dome Cap-rock boring MRIG-9 Technical Report, BMI/ONWI-610, Office of Nuclear Waste Isolation, Columbus, Ohio.
 170. Whiting, G. H. (1981). Strategic Petroleum Reserve (SPR) geologic site characterization report, Sulphur Mines Salt Dome, SAND80-7141, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, March 1981.
 171. Wilson, B. (2002). Experts say hole apparent in 1993. *Hutchinson News*, Sunday, February 17, Web site: www.hutchnews.com
 172. Wikipedia (2006). Istmo de Tehuantepec, Enciclopedia Libre. Página modificada por última vez el 12 oct 2006. Disponible en Web: http://es.wikipedia.org/wiki/Istmo_de_Tehuantepec
-