



Vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos: una propuesta para su estimación

Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco
y Pilar Fernández Lomelín
Coordinadoras



Silke Cram Heydrich (coord.). Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM. silkecram@igg.unam.mx

Oralia Oropeza Orozco (coord.). Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM. orooro@igg.unam.mx

María del Pilar Fernández Lomelín (coord.). Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM. pilarf@igg.unam.mx

María Teresa Sánchez Salazar. Departamento de Geografía Económica del Instituto de Geografía de la UNAM. mtss@igg.unam.mx

José María Casado Izquierdo. Departamento de Geografía Económica del Instituto de Geografía de la UNAM. chema@igg.unam.mx

Mario Arturo Ortiz Pérez (†). Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM.

Jean-François Parrot Faure. Laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía de la UNAM. parrot@igg.unam.mx

Irene Marie Sommer Cervantes (†). Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM.

Mayelli Hernández Juárez. Secretaría de Energía. mayellihj@gmail.com.

Ania Mendoza Cantú. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

**Vulnerabilidad intrínseca ante derrames
de hidrocarburos: una propuesta para su
estimación**

Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Colección: Geografía para el siglo XXI
Serie: Libros de investigación, núm. 26

Vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos: una propuesta para su estimación

*Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco
y Pilar Fernández Lomelín
(Coordinadoras)*



México, 2020

Silke Cram Heydrich, Silke

Vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos. una propuesta para su estimación /

Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco y Pilar Fernández Lomelín. – México :

UNAM. Instituto de Geografía, 2020

108 p.; il.; 22 cm. – (Colección Geografía para el siglo XXI. Serie Libros de investigación; 26)

ISBN 970-32-2976-X (Obra completa)

ISBN 978-607-30-2939-1 (Esta obra)

DOI <http://dx.doi.org/10.14350/gsxxi.li.26>

1. Hidrocarburos – Riesgos - Manuales I. Oropeza Orozco, Oralia, coaut. II. Fernández Lomelín, Pilar, coaut. III. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía IV. serie. V. .t.

Vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos: una propuesta para su estimación

Primera edición, 15 de diciembre de 2019

D.R. © 2019 Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria,

Coyoacán, 04510 México, Cd. Mx.

Instituto de Geografía,

www.unam.mx, www.igeograf.unam.mx

Editor académico: Atlántida Coll-Hurtado

Editores asociados: María Teresa Sánchez Salazar y Héctor Mendoza Vargas

Editor técnico: Raúl Marcó del Pont Lalli

Foto de portada: Derrame en Coatzacoalcos del oleoducto Nuevo Teapa-Poza Rica. Cortesía: PEMEX

Prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio,
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales

La presente publicación presenta los resultados de una investigación científica y contó con dictámenes de expertos externos, de acuerdo con las normas editoriales del Instituto de Geografía

Geografía para el siglo XXI (Obra general)

Serie: Libros de investigación

ISBN (Obra general): 970-32-2976-X

ISBN: 978-607-30-2939-1

DOI: <http://dx.doi.org/10.14350/gsxxi.tu.26>

Impreso y hecho en México

Índice

Introducción.....	11
<i>Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco y Pilar Fernández Lomelín</i>	
Parte I	
Capítulo 1. Áreas prioritarias para abordar el problema de los derrames de hidrocarburos a nivel nacional.....	17
<i>Ma. Teresa Sánchez Salazar y José María Casado Izquierdo</i>	
Capítulo 2. Evaluación de la vulnerabilidad de unidades espaciales.....	35
<i>Oralia Oropeza Orozco, Silke Cram Heydrich, Pilar Fernández Lomelín, Ma. Teresa Sánchez Salazar, José María Casado Izquierdo e Irene Sommer Cervantes</i>	
Capítulo 3. Identificación y delimitación de unidades territoriales.....	47
<i>Mario Arturo Ortiz Pérez, Oralia Oropeza Orozco e Irene Sommer Cervantes</i>	
Capítulo 4. Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad.....	73
<i>Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco, Pilar Fernández Lomelín, Jean-François Parrot Faure, Ania Mendoza Cantú, José María Casado Izquierdo y Ma. Teresa Sánchez Salazar</i>	
Capítulo 5. Métodos de integración de resultados.....	99
<i>Pilar Fernández Lomelín, Irene Sommer Cervantes, Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco, José María Casado Izquierdo y Ma. Teresa Sánchez Salazar</i>	

Parte II

Capítulo 6. Métodos de medición de variables e indicadores: Vulnerabilidad intrínseca del medio biofísico.....	107
<i>Mayelli Hernández Juárez, Jean-François Parrot Faure y Oralia Oropeza Orozco</i>	
Capítulo 7. Métodos de medición de variables e indicadores: Medio socioeconómico y Vulnerabilidad extrínseca.....	175
<i>José María Casado Izquierdo, Ma. Teresa Sánchez Salazar, Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco y Ma. Pilar Fernández Lomelín</i>	
Capítulo 8. Procedimiento de Análisis Jerárquico.....	189
<i>Irene Sommer Cervantes, Pilar Fernández Lomelín, Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco, Jean-François Parrot Faure, Mayelli Hernández Juárez, José María Casado Izquierdo y Ma. Teresa Sánchez Salazar</i>	
Conclusiones y recomendaciones.....	207
Referencias.....	211
Apéndice. Resumen de variables.....	223

Introducción

Silke Cram Heydrich

Oralia Oropeza Orozco

Pilar Fernández Lomelín

Departamento de Geografía Física

Instituto de Geografía, UNAM

Esta publicación se enmarca en el esfuerzo de proporcionar al usuario una guía para planear y llevar a cabo una evaluación de la vulnerabilidad en áreas sujetas a derrames de petróleo crudo⁸ procedentes de oleoductos; las escalas de trabajo son regional y de semidetalle (1:250 000-1:50 000). La red de ductos de la industria petrolera en México, distribuida a lo largo y ancho del país, está expuesta a factores naturales y humanos que ocasionan de manera frecuente fugas y derrames de hidrocarburos. Ante la incidencia de estos eventos y considerando que pueden constituir una amenaza para los ecosistemas, la salud de los pobladores y las actividades económicas que se desarrollan en las zonas aledañas a las instalaciones petroleras, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México iniciaron en 2007 un estudio cuya finalidad fue diseñar una metodología para identificar áreas ambientalmente sensibles o vulnerables a estas emergencias ambientales (INE, 2007, 2008, 2009, 2010; Cram *et al.*, 2010; Mendoza-Cantú *et al.*, 2011). Este documento facilitará la comprensión de la vulnerabilidad con el fin de evaluar, prevenir y reducir uno de los principales componentes del riesgo de desastres.

El objetivo era subdividir unidades espaciales de una región (delimitada desde el punto de vista natural, político-administrativo o ambos) en categorías

⁸ El producto que se obtiene de la extracción es denominado petróleo crudo y sus componentes son gas natural, agua e hidrocarburos. En las baterías de separación se dividen estos tres componentes y por las tuberías circula a continuación gas natural o hidrocarburos. En este documento no se hace la distinción entre los distintos componentes y se maneja simplemente como petróleo crudo.

según su capacidad para resistir o recuperarse de cambios adversos, de acuerdo con sus características físicas, biológicas y socioeconómicas, y para lograrlo se propuso una combinación de cartografía, variables e indicadores, de técnicas de análisis multicriterio y de análisis espacial para elaborar mapas de vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos a partir de oleoductos.

La identificación y la cartografía de la vulnerabilidad de unidades territoriales, que pueden ser paisajes u otros similares, son aspectos centrales en el diseño y la elaboración de políticas públicas orientadas a evitar, controlar o adaptarse a los efectos adversos que generan los peligros o amenazas, ya que permiten planificar y llevar a cabo acciones oportunas para hacerles frente (Adger, 2001) y minimizar, en lo posible, dichos efectos; también son útiles para establecer criterios de priorización en las zonas de atención, así como las instalaciones que deban ser mantenidas y vigiladas por el riesgo que representan.

La utilización de este método es muy diversa; por ejemplo, puede aplicarse para:

- El cumplimiento de la NOM-027-SESH-2010. Administración de la integridad de ductos de recolección y transporte de hidrocarburos.
- La identificación de puntos críticos (zonas sensibles) durante la fase de diagnóstico ambiental en las manifestaciones de impacto ambiental, estudios de línea base ambiental y estudios de riesgo para la industria del petróleo.
- Los programas estatales y municipales de protección civil.
- La evaluación de propuestas de inversión de Petróleos Mexicanos (Pemex) o de la industria privada para la construcción de nuevos ductos en áreas ambientalmente sensibles.

Por otro lado, cabe mencionar que se cuenta con varios programas de cómputo desarrollados *ad hoc* en el Instituto de Geografía de la UNAM por uno de sus investigadores, los cuales son de uso libre para el público y son compatibles con los sistemas de información geográfica más comunes (estos programas están disponibles en la página web del Instituto de Geografía de la UNAM: <http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage.html>, así como métodos de análisis espacial y desarrollo de *software* de análisis espacial).

Esta guía es flexible, apta para adaptarse a las diferentes regiones de México que albergan infraestructura petrolera, a distintas escalas de trabajo y con diferentes tipos de datos (cuantitativos y cualitativos). Está basada en variables que pueden obtenerse directamente de imágenes de satélite y mapas, así como fuentes

de información disponibles, de fácil acceso y bajo costo. Asimismo, es resultado de la adecuación de los enfoques de riesgo que actualmente se manejan en el mundo, a las condiciones de nuestro país, mediante el trabajo y la experiencia de un equipo multidisciplinario de investigadores mexicanos.

No obstante que esta guía está enfocada a determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos a partir de oleoductos, por tipo de geosistema en un área, el procedimiento puede utilizarse también para la identificación de áreas vulnerables ante otros tipos de peligro, tales como inundaciones o procesos de remoción de masas; de igual forma, puede ser aplicada en la selección de sitios para la reubicación de poblaciones, la disposición de residuos sólidos, etcétera.

Sólo resta añadir que, a pesar de sus limitaciones, este método es producto de la discusión y la integración de múltiples conceptos desarrollados por las distintas disciplinas involucradas en un estudio ambiental; por ejemplo, las visiones ecológica, físico-geográfica, geográfico-socioeconómica, territorial, de análisis espacial y la proveniente de los numerosos enfoques de riesgo que se manejan en la actualidad. Además, aunque sustentados en reportes científicos especializados nacionales e internacionales, los conceptos, variables y criterios que constituyen la médula de este trabajo están particularmente concebidos y probados para ser aplicados en el contexto de nuestro país y son el resultado de años de experiencia y de trabajo de campo de investigadores mexicanos.

Parte I

Esta obra está conformada por dos partes: la primera (Capítulos primero al quinto) podría considerarse como la parte teórica, y la segunda (Capítulos sexto al octavo), como la parte técnica.

La guía que se presenta se justifica por la magnitud de la actividad petrolera que se lleva a cabo en nuestro país, por lo que en el primer capítulo se hace una breve descripción de los criterios y condiciones para establecer áreas prioritarias nacionales; esto es, las áreas o regiones del país en donde es más factible que se presenten derrames de petróleo crudo a partir de oleoductos.

Se parte de un marco conceptual (segundo capítulo) en el que se definen y explican los esquemas adoptados para su construcción y que, a la vez, son los más aceptados y utilizados en los ámbitos académicos nacional e internacional. Dichos esquemas sirven de contexto para insertar y elaborar los conceptos que se utilizan a lo largo de la obra. Muchos de estos conceptos tienen diferente significado e interpretación según la aplicación que se les dé o, incluso, la formación de los especialistas involucrados.

A partir del tercer capítulo se aborda propiamente la metodología de evaluación, que se inicia con el método para delimitar unidades territoriales (unidades de terreno y geosistemas); incluye una justificación de la adopción del geosistema como unidad territorial para llevar a cabo las evaluaciones de vulnerabilidad.

Se continúa en el cuarto capítulo con los procedimientos a seguir para la correcta selección de variables e indicadores del medio biofísico y socioeconómico, para la evaluación del estado actual de la vulnerabilidad intrínseca; se establecen categorías, considerando los valores máximo y mínimo obtenidos para el conjunto de geosistemas de la región que se pretende evaluar. Las cinco categorías de vulnerabilidad adoptadas en este trabajo son muy alta, alta, media, baja y muy baja. En este capítulo se describen las variables seleccionadas para estimar la vulnerabilidad de los tipos de geosistemas (vulnerabilidad intrínseca) y su relación con posibles derrames de petróleo crudo desde ductos (vulnerabilidad extrínseca) aplicados a un caso concreto: el área de Poza Rica, Veracruz, México, donde este problema suele presentarse frecuentemente.

En el quinto capítulo se describe el procedimiento de análisis jerárquico (PAJ), el cual permite la integración y síntesis de la información obtenida, por medio del análisis de las variables, con el objeto de permitir una comparación entre las unidades espaciales (en este caso, entre los tipos de geosistema), así como una priorización de la vulnerabilidad (análisis multicriterio).

Capítulo 1. Áreas prioritarias para abordar el problema de los derrames de hidrocarburos a nivel nacional

*Ma. Teresa Sánchez Salazar
José María Casado Izquierdo*

Departamento de Geografía Económica
Instituto de Geografía, UNAM

Vulnerabilidad de la infraestructura petrolera

La importancia de la industria petrolera en el desarrollo económico de México radica no sólo en su valor estratégico para la economía nacional en general, sino también en que produce bienes e insumos indispensables para garantizar la movilidad y permitir el desenvolvimiento adecuado de la sociedad en general; por ende, se trata de una industria de importancia política trascendental, ya que permite garantizar el funcionamiento del país.

Asimismo, las actividades de dicha industria son también una fuente notable de contaminantes que pueden ocasionar daños significativos al medio ambiente y a la sociedad, debido a la naturaleza de su operación y/o a insuficiencias en los programas de mantenimiento, procedimientos y seguimiento riguroso de la disciplina operativa de la infraestructura petrolera, como el caso de los ductos y/o las instalaciones para el manejo de la producción, los cuales son considerados “infraestructuras críticas” por constituir instalaciones y redes cuya interrupción o destrucción puede tener repercusiones trascendentales en la salud, la seguridad y el bienestar económico de la población (COM, 2004; Mañas, 2009).

Existen diferentes tipos de infraestructuras críticas en varios sectores de la economía: energético, financiero y bancario, transporte y distribución, comunicaciones, salud, abasto de alimentos, servicios, gobierno. En el caso del sector energético, destacan, por ejemplo, la infraestructura para la producción de petróleo y gas, las instalaciones de almacenamiento, las refinerías, los complejos petroquímicos, los puertos petroleros, las centrales eléctricas, la red de distribución eléctrica y las subestaciones, entre otros (Mañas, 2009).

La infraestructura de la industria petrolera se encuentra desigualmente distribuida en el territorio nacional debido a que la cadena de valor de hidrocarburos constituye una colección de segmentos, procesos y subprocesos que describen las operaciones de *upstream* (exploración, desarrollo de campos, operación de campos para producción y Oil Field Services [OFS]), *midstream* (transporte, procesamiento y almacenamiento de hidrocarburos y/o petrolíferos, mezclado de hidrocarburos) y *downstream* (refinación, petroquímica, procesamiento y comercialización de gas y petrolíferos) (IPADE Business School y Strategy&, s.f.). Lo anterior permite establecer sinergias ante la posible amenaza de un derrame de petróleo con efectos que se pueden magnificar, mientras que en otras áreas la infraestructura se reduce a la presencia de los oleoductos que las cruzan para dirigirse a su destino final. La desigual distribución geográfica de instalaciones petroleras obliga a definir criterios para seleccionar las áreas prioritarias del país con el fin de realizar estudios de vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos por fallas en oleoductos. Los factores que intervienen en la incidencia y la magnitud de los efectos de los derrames de petróleo crudo son:

- El número de oleoductos existentes en el territorio y el grosor de las líneas, que refleja su capacidad de conducción.
- La presencia de otros ductos en el mismo derecho de vía, que transportan otro tipo de sustancias, como gas natural y LP, petrolíferos y petroquímicos, que podrían resultar afectados por los derrames de petróleo en caso de un evento extremo (por ejemplo, una explosión).
- Las instalaciones petroleras interconectadas a través de los oleoductos en su origen (a) y su destino (b y c):
 - a. El número de pozos petroleros existentes en una zona o su densidad por unidad de superficie (en caso de no contar con esta información, la importancia de la presencia de pozos petroleros puede inferirse de forma indirecta a partir de la producción de petróleo crudo de un territorio).
 - b. La infraestructura para la transformación del petróleo crudo (refinerías), cuya importancia se refleja a partir de su capacidad de procesamiento de petróleo en el territorio.
 - c. La infraestructura de almacenamiento de petróleo crudo en terminales marítimas y terrestres, cuya relevancia se aprecia en la capacidad nominal de almacenamiento.
- Otras instalaciones de la industria petrolera ubicadas en las inmediaciones de los oleoductos.

Regiones petroleras prioritarias susceptibles a derrames

El país puede dividirse en regiones con base en los factores señalados, presentadas en orden de prioridad para su estudio en relación con posibles derrames de hidrocarburos desde oleoductos:

- Región Marina Golfo Sureste (Campeche y aguas territoriales de las regiones marinas Noreste y Suroeste).
- Región Golfo Centro (Veracruz Norte, Centro y Sur) y Golfo Sur (Veracruz Sureste).
- Región Golfo Sureste (Tabasco y Chiapas).
- Región Pacífico Sur (Oaxaca-Istmo).
- Región Centro (Ciudad de México, Estado de México, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Querétaro).
- Región Golfo Norte (Tamaulipas).
- Región Centro-Occidente (Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Aguascalientes, Zacatecas y San Luis Potosí).
- Región Noreste y Norte (Nuevo León, Coahuila, Chihuahua y Durango).
- Otras: Sonora, Sinaloa, Campeche y Yucatán, Baja California.

La Figura 1 muestra las regiones prioritarias y la infraestructura que las hace vulnerables ante derrames. A continuación se hace una descripción de las características de cada una.

Región Marina Golfo Sureste⁹

Esta zona abarca el área continental de Campeche y las respectivas aguas territoriales (regiones marinas Noreste y Suroeste, de acuerdo con la regionalización de Pemex). Se considera la región con prioridad número uno por ser la zona productora de petróleo crudo y de gas natural más importante del país, con 53.1% y 33.3% de la producción nacional, respectivamente (Pemex, 2018a). Su alta vulnerabilidad estriba en el gran número de plataformas marinas que comprende (255), en los más de 600 km de oleoductos y en un sistema paralelo de gasoductos que conectan las plataformas con el territorio continental de Campeche y

⁹ Esta región es la más vulnerable a derrames de petróleo crudo. Sin embargo, es importante aclarar que ésta, junto con los proyectos que se desarrollan en áreas profundas, escapan de los objetivos de esta guía, la cual fue diseñada para medir la vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres.

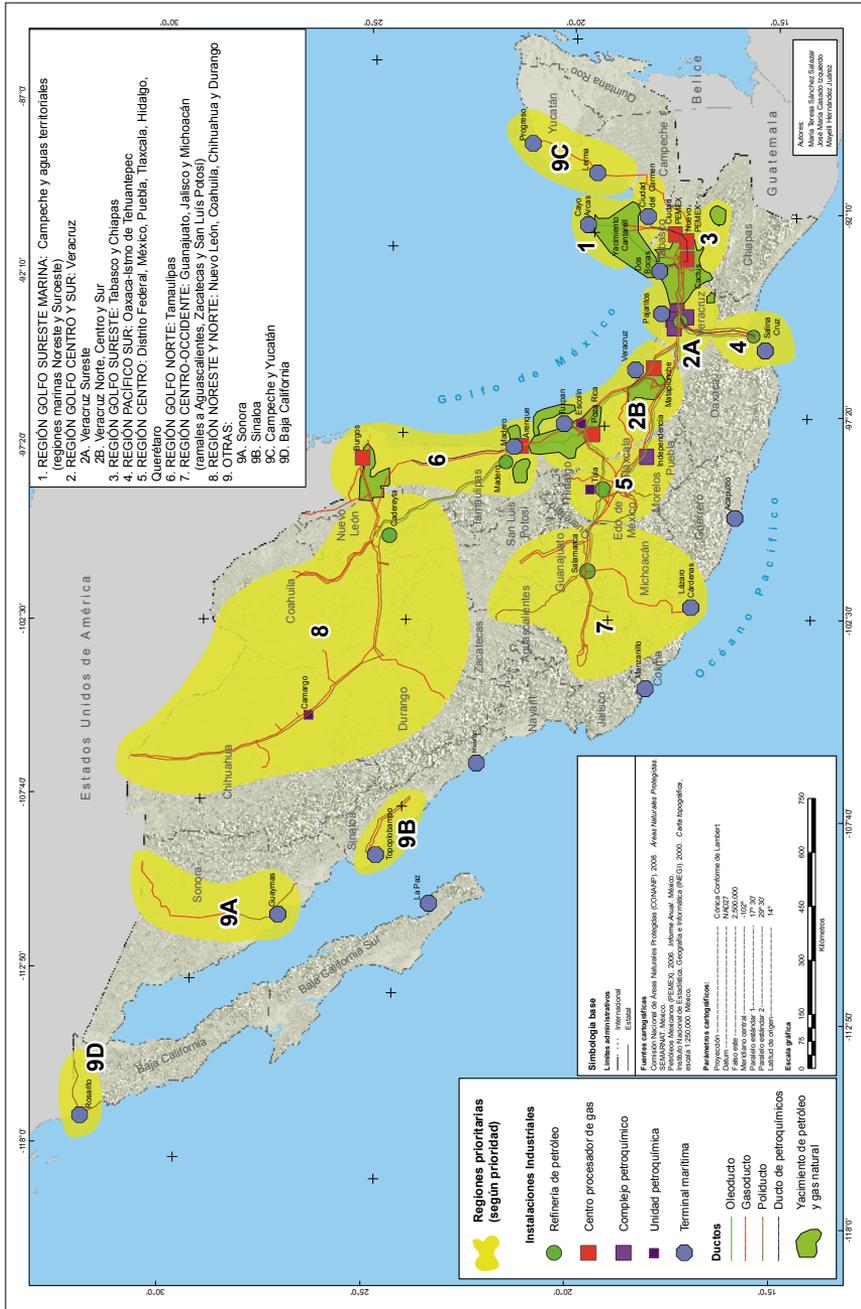


Figura 1. Regiones prioritarias por la infraestructura petrolera que albergan. Fuente: elaboración propia con base en Pemex (2018a).

Tabasco (Pemex, 2018a). En Cayo Arcas, a 150 km de Ciudad del Carmen, se ubican las instalaciones para almacenamiento y exportación de petróleo crudo Floating Production Storage and Offloading (FPSO) (Unidad Flotante de Producción, Almacenamiento y Descarga) YúmK'ak'Náab (2.2 millones de barriles de capacidad de almacenamiento) y FPSO Ta'Kuntah (2.3 millones de barriles de capacidad de almacenamiento), que convierten este sitio en la principal plataforma de exportación petrolera en el país (70% de las exportaciones totales de petróleo crudo) (Pemex, 2018a; PMI, 2019). Asimismo, en Atasta, Campeche, se ubica la Planta de Recompresión de Gas de Pemex (1 000 millones de pies cúbicos diarios [MMpcd] de capacidad) y la Planta para la Obtención, Compresión y Suministro de Nitrógeno al Campo Cantarell (1.2 MMpcd de nitrógeno de capacidad), el cual se transporta mediante nitrogenoductos a las plataformas marinas para inyectarlo al yacimiento Cantarell, a 80 km de distancia, y contribuye a evitar que su producción decline a un ritmo más rápido (CRE, 2017).

Esta región es la de mayor prioridad de atención ambiental debido a que los ecosistemas costeros y marinos son los más frágiles y, por ende, los más vulnerables a derrames de petróleo crudo, tanto en los pozos de las plataformas como en los oleoductos que los conectan con el territorio continental, además de los que puedan originarse desde los propios barcos petroleros que circulan por el Golfo de Campeche. Las principales características de esta región se resumen en las Tablas 1.1a, 1.1b y 1.1c.

Tabla 1.1a. Reservas de hidrocarburos totales y probadas en la Región Marina Golfo Sureste, 2017.

Regiones	Reservas de hidrocarburos totales (MMbpce)*	Porcentaje del total nacional	Reservas probadas (MMbpce)	Porcentaje del total nacional
Región Marina Noreste	9 148	41.3	4 515	52.7
Región Marina Suroeste	3 335	15.1	1 234	14.4
Total regiones marinas	12 483	56.4	5 749	67.1
Total nacional	22 149	100.0	8 562	100.0

* MMbpce: millones de barriles de petróleo crudo equivalentes.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.1b. Producción de petróleo crudo y gas natural en la Región Marina Golfo Sureste, 2017.

Infraestructura	Producción de crudo (Mbd)*	Porcentaje del total nacional	Producción de gas natural (MMpcd)**	Porcentaje del total nacional
Región Marina Noreste	1 035	53.1	1 686	33.3
Activo Integral Cantarell	177	9.1	1 133	22.4
Activo Integral KuMaloobZaap	858	44.0	552	10.9
Región Marina Suroeste	549	28.2	1 202	23.7
Activo Integral Abkatún-Pol-Chuc	203	10.4	2030	6.3
Activo Integral Litoral Tabasco	346	17.8	346	17.4
Total regiones marinas	1 584	81.3	2 888	57.0

* Mbd: miles de barriles diarios. ** MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.1c. Infraestructura petrolera en la Región Marina Golfo Sureste, 2017.

Infraestructura	Número / Capacidad
Plataformas marinas (PEP)	255
TM* Cayo Arcas	4.6 MMb** (2 FPSO)
Planta de recompresión de gas	500 MMpcd***
Planta para la obtención, compresión y suministro de nitrógeno al Campo Cantarell	1.2 MMpcd de nitrógeno
Sistema troncal y regional de ductos submarinos	2 271 km

* TM: terminal marítima. ** MMb: millones de barriles. *** MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b).

Región Golfo Centro y Sur

Comprende el estado de Veracruz, donde se ubica la mayor longitud de ductos de la zona continental del territorio nacional; entre ellos, los oleoductos del sistema troncal de ductos que se dirigen a las seis refinerías del país, y de los sistemas regionales del sureste de Veracruz y de las regiones de Poza Rica, Chi-

contepec, Altamira y Matapionche. Esta región, a su vez, puede dividirse en dos subregiones:

A. Subregión Veracruz Sureste

Es la zona con prioridad dos en el país y número uno a nivel continental por la cantidad e importancia de las instalaciones de Pemex concentradas en ese territorio; las principales son:

- a) Refinería de Minatitlán, con 13.0% de la producción nacional de productos refinados (Pemex, 2018a). En 2011 concluyó su reconfiguración y abastece al sureste del país de productos petrolíferos.
- b) Complejos petroquímicos La Cangrejera, Morelos, Cosoleacaque y Pajaritos¹⁰ cuya producción representa 57.3% de la elaboración de petroquímicos de Pemex (Pemex, 2018a).
- c) Terminal marítima (TM) de Pajaritos, principal puerto petrolero del país por su capacidad de almacenamiento (10 millones de barriles de petróleo crudo equivalente) y la diversidad de productos que maneja (además del petróleo crudo). Tiene el segundo lugar en la exportación de petróleo crudo y es el segundo puerto en movimientos de cabotaje de petróleo y sus derivados a nivel nacional.
- d) Centro de Almacenamiento de Petróleo Crudo en Cavernas de Origen Salino de Tuzandépetl (8 millones de barriles de petróleo crudo de capacidad de almacenamiento). Funciona como un amortiguador en caso de alguna eventualidad (p. ej., un huracán) que obligue a suspender las operaciones de carga de los buques petroleros, y cuando la capacidad de almacenamiento de la TM de Pajaritos es rebasada.
- e) Estación Central de Nuevo Teapa, principal estación de bombeo y distribución de petróleo del país. Recibe 90% del petróleo crudo procedente de las áreas productoras de Tabasco, Chiapas y la Sonda de Campeche a través de ductos; de ahí es reenviado a las refinerías y terminales marítimas de Pajaritos y Salina Cruz.
- f) Centro Comercializador Palomas, donde se realizan las mezclas de petróleo crudo conforme a las necesidades del mercado doméstico y de exportación.

¹⁰ En 2013, Pemex y la empresa Mexichem concretaron una sociedad para el manejo del Complejo de Pajaritos, el cual se constituyó como una nueva empresa con mayoría de capital privado, denominada Petroquímica Mexicana de Vinilo (Pemex, 2013).

- g) Activo Integral Cinco Presidentes, uno de los cuatro que conforman la Región Sur de producción de hidrocarburos. Tiene una participación poco significativa a nivel nacional, pues sólo produce 3.2% de la producción de petróleo crudo y 2.2% de la de gas natural (Pemex, 2018a).
- h) Por esta región cruzan de este a oeste los oleoductos del sistema troncal que une la zona productora del sureste del país con el Istmo de Tehuantepec (refinería y terminal marítima de Salina Cruz) y con el resto del país, y el sistema regional que interconecta las áreas de producción local con la Refinería de Minatitlán y la TM de Pajaritos. Junto con los del resto del estado de Veracruz constituyen una red que alcanza 3 130 km de longitud de oleoductos de diferentes grosores, principalmente entre 20 y 48 pulgadas de diámetro (Sener, 2018a).

En las Tablas 1.2a, 1.2b y 1.2c se sintetizan la infraestructura y los aspectos productivos de la subregión Veracruz Sureste.

B. Subregión Veracruz Norte, Centro y Sur

Abarca el resto del estado de Veracruz y comprende la siguiente infraestructura:

- a) Activos Integrales Poza Rica-Altamira, Aceite Terciario del Golfo (Chicontepec) y Veracruz, que conforman las zonas productoras de petróleo crudo del norte, centro y sur de la entidad. Son parte de la Región Norte de producción de hidrocarburos, y en conjunto representan 5.0% de la producción nacional de petróleo crudo y 9.3% de la de gas natural (Pemex, 2018a).
- b) Redes regionales de oleoductos y gasoductos, y una parte muy importante de los sistemas troncales de oleoductos y gasoductos que cruzan el

Tabla 1.2a. Producción de petróleo crudo y gas natural en la Subregión Veracruz Sureste, 2017.

Infraestructura	Producción de crudo (Mbd)*	Porcentaje del total nacional	Producción de gas natural (MMpcd)**	Porcentaje del total nacional
Región Sur				
Activo Integral Cinco Presidentes	63	3.2	109	2.2

* Mbd: miles de barriles diarios. **MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

territorio veracruzano hacia las refinerías de Ciudad Madero, Tamaulipas; Cadereyta, Nuevo León; Tula, Hidalgo, y Salamanca, Guanajuato. Asimismo, circulan por esta zona sistemas de poliductos para transportar productos petrolíferos hacia la Región Centro del país.

- c) Complejos Procesadores de Gas de Poza Rica y Matapionche, cuyo proceso de gas húmedo para 2017 representó 4.0% del total nacional (Pemex, 2018a).
- d) Unidad Petroquímica de Escolín en Poza Rica, la cual salió de operación desde 2008 (Pemex, 2018a).

Tabla 1.2b. Infraestructura de refinación y petroquímica en la Subregión Veracruz Sureste, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso	Porcentaje del total nacional	Producción	Porcentaje del total nacional
Refinería de Minatitlán	285 Mbd	13.0	102 Mbd	13.0
CPQ* La Cangrejera	3 300 Mt**	26.6	1 993 Mt	21.2
CPQ Pajaritos	1 050 Mt	8.5	150 Mt	1.6
CPQ Cosoleacaque	4 306 Mt	34.7	1 343 Mt	14.3
CPQ Morelos	2 730 Mt	22.0	1 914 Mt	20.3
Total CPQ	11 386 Mt	91.8	5 400 Mt	57.3

* CPQ: complejo petroquímico. **Mt: miles de toneladas.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a; 2018b) y Sener (2018b).

Tabla 1.2c. Otra infraestructura petrolera en la Subregión Veracruz Sureste, 2018.

Infraestructura	Capacidad
TM* Pajaritos	10 MMbpce**
Centro de almacenamiento de petróleo crudo en cavernas de Tuzandépetl	8 MMbpce
Estación central de bombeo y distribución de Nuevo Teapa	s/d***
Centro comercializador Palomas	s/d
Sistema troncal y regional de ductos	s/d

* TM: terminal marítima.

**MMbpce: millones de barriles de petróleo crudo equivalentes.

***s/d: sin dato.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b).

- e) Terminal marítima Tuxpan, tercera más importante del Golfo de México por sus movimientos de cabotaje de productos petrolíferos (2.5 millones de barriles de capacidad). De esa terminal parten dos poliductos hacia la Región Centro del país para el abastecimiento de gasolinas nacionales y de importación para el Valle de México.

En las Tablas 1.2d, 1.2e y 1.2f se resumen la infraestructura y las principales características productivas de esta subregión.

En ambas subregiones del estado de Veracruz se presenta una sensibilidad ambiental muy alta a fenómenos peligrosos de origen natural y antrópico, y están caracterizadas por una alta complejidad y fragilidad de los ecosistemas costeros del trópico húmedo y una amplia gama de ambientes acuáticos (Toledo, 1982; Oropeza y Enríquez, 2003).

Región Golfo Sureste

Esta región comprende los estados de Tabasco y Chiapas, y constituye la segunda zona productora de petróleo crudo más importante del país (10.4% de la producción nacional) y la segunda de gas natural asociado (17.8%), hidrocarburos obtenidos de los tres Activos Integrales de la Región Sur ubicados en su territorio (Pemex, 2018a). De los 17 municipios de Tabasco, 13 cuentan con actividad petrolera, así como cinco del norte de Chiapas. Por este motivo, por la Región Golfo Sureste cruza una amplia red regional de oleoductos que colectan el petróleo de los campos productores, además del sistema troncal de oleoductos procedente de

Tabla 1.2d. Producción de petróleo crudo y gas natural en la Subregión Veracruz Norte, Centro y Sur, 2017.

Infraestructura	Producción de crudo (Mbd)*	Porcentaje del total nacional	Producción de gas natural (MMpcd)**	Porcentaje del total nacional
Región Norte				
Activo Integral Poza Rica-Altamira + Activo Integral Aceite Terciario del Golfo (Chicontepec)	83	4.3	207	4.1
Activo Integral Veracruz	15	0.8	263	5.2
Total Activos Integrales	98	5.0	470	9.3

*Mbd: miles de barriles diarios. **MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

la región marina de la Sonda de Campeche. En conjunto, ambos sistemas abarcan alrededor de 960 km de longitud y su diámetro varía entre 48 y 6 pulgadas de espesor (Pemex, 2018b). Adicionalmente, por esta región cruza también una red igualmente importante de gasoductos troncales y regionales, procedentes de las plataformas marinas de la Sonda de Campeche y de los campos productores de gas natural de la región, que convergen en cuatro centros procesadores de gas instalados en territorios de Tabasco y Chiapas: Cactus, Nuevo Pemex, Ciudad Pemex y La Venta (81.3% del total nacional de procesamiento de gas húmedo, en conjunto); los dos primeros son los más importantes del país, seguidos por el del Complejo de Burgos, ubicado en la Región Golfo Norte (Pemex, 2018a). En el estado de Tabasco se localiza, además, la TM de Dos Bocas, que en 2017 fue el tercer puerto exportador de petróleo crudo más importante del país, con una capacidad de almacenamiento para 8 MMb de petróleo crudo. Las principales instalaciones petroleras de esta región, así como sus características productivas, pueden apreciarse en las Tablas 1.3a, 1.3b, 1.3c y 1.3d.

Tabla 1.2e. Infraestructura de procesamiento de gas y petroquímica en la Subregión Veracruz Norte, Centro y Sur, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso	Porcentaje del total nacional	Producción / Proceso (MMpcd)*	Porcentaje del total nacional
Unidad PQ** Escolín***	337 Mt	2.7	--	--
CPG**** Poza Rica			144	3.2
CPG Matapionche			45	1.0
Total CPG			189	4.2

*MMpcd: millones de pies cúbicos diarios. **PQ: petroquímica. ***Sin producción desde 2008. ****CPG: complejo procesador de gas.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a; 2018b).

Tabla 1.2f. Otra infraestructura petrolera en la Subregión Veracruz Norte, Centro y Sur, 2018.

Infraestructura	Número/Capacidad
Plataformas marinas	15
TM* Tuxpan	2.5 MMb**
Sistema troncal y regional de ductos	s/d

*TM: terminal marítima. **MMb: millones de barriles.

Fuente: elaboración propia con datos de Sener (2018a).

Tabla 1.3a. Reservas de hidrocarburos totales y probadas en la Región Golfo Sureste, 2017.

Regiones	Reservas de hidrocarburos totales (MMbpce)*	Porcentaje del total nacional	Reservas probadas (MMbpce)	Porcentaje del total nacional
Región Sur**	2 132	9.6	1 513	17.7
Total nacional	22 149	100.0	8 562	100.0

*MMbpce: millones de barriles de petróleo crudo equivalentes. **En la Región Golfo Sureste se ubican cuatro de los cinco Activos Integrales en que tradicionalmente se subdividía la Región Sur como productora de hidrocarburos, por ello se incluyó esta tabla en el apartado correspondiente a esta región.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.3b. Producción de petróleo crudo y gas natural en la Región Golfo Sureste, 2017.

Infraestructura	Producción de crudo (Mbd)*	Porcentaje del total nacional	Producción de gas natural (MMpcd)**	Porcentaje del total nacional
Región Sur				
Activo Integral Bellota-Jujo	72	3.7	183	3.6
Activo Integral Macuspana-Muspac	31	1.6	292	5.8
Activo Integral Samaria-Luna	100	5.1	427	8.4
Total Activos Integrales	203	10.4	902	17.8

*Mbd: miles de barriles diarios. **MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.3c. Infraestructura de procesamiento de gas en la Región Golfo Sureste, 2017.

Infraestructura	Producción / Proceso (MMpcd)*	Porcentaje del total nacional
CPG** Cactus	1 148	35.5
CPG Nuevo Pemex	599	18.5
CPG Ciudad Pemex	805	24.9
CPG La Venta	79	2.4
Total CPG	2 631	81.3

*MMpcd: millones de pies cúbicos diarios. **CPG: complejo procesador de gas.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.3d. Otra infraestructura petrolera en la Región Golfo Sureste, 2019.

Infraestructura	Número / Capacidad
Campos de petróleo	320 aprox.
Pozos	>11 000
TM* Dos Bocas	s/d
Sistema de ductos que conectan pozos con estaciones de bombeo y CPG de la región	2 500 km
Sistema troncal de ductos que atraviesan la región	8 000 km de ductos 4 000 km de líneas de conducción

*TM: terminal marítima.

Fuente: elaboración propia con datos de CNH (2019) y Pemex (2018b).

La relevancia de esta región en cuanto a su vulnerabilidad ante derrames de crudo estriba en la gran fragilidad de los ecosistemas que se ubican en ella, que constituyen áreas inundables y sistemas lagunares, fluviales y costeros en ambientes tropicales húmedos.

Región Pacífico Sur

Esta región abarca la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec, donde se ubican, en Salina Cruz, la tercera refinería más importante del país por su producción de petrolíferos, con 17.7% del total nacional (Pemex, 2018a) y la TM que exporta petróleo crudo a Japón (cuarto puerto exportador de petróleo crudo del país) y realiza los movimientos de cabotaje de productos petrolíferos de la refinería y de otros productos petroquímicos en la costa del Pacífico; en este rubro, ocupa el primer lugar a nivel nacional.

La TM de Salina Cruz es una instalación estratégica para el desarrollo del país, pues cualquier afectación o interrupción de su proceso normal de operación implicaría un riesgo potencial en el abasto de hidrocarburos a todos los puertos de la costa del Pacífico. Por esta región cruza el sistema troncal de ductos que procede del Istmo norte, con oleoductos de más de 300 km de longitud, que oscilan entre 24 y 48 pulgadas de diámetro (Pemex, 2018b). En las Tablas 1.4a y 1.4b pueden apreciarse las características de la infraestructura y el proceso de productos petroleros de la Región Pacífico Sur.

Región Centro

Esta región incluye los estados de Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Distrito Federal y Querétaro. Comprende las siguientes instalaciones de Pemex:

Tabla 1.4a. Capacidad de proceso y producción de la Refinería de Salina Cruz, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso (Mbd)	Porcentaje del total nacional	Producción (Mbd)*	Porcentaje del total nacional
Refinería de Salina Cruz	350	21.6	139	17.7

*Mbd: miles de barriles diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a) y Sener (2018b).

Tabla 1.4b. Infraestructura de la industria petrolera en la Región Pacífico Sur, 2017.

Infraestructura	Capacidad
TM* Salina Cruz	29 tanques de almacenamiento con capacidad de 1.5 MMb** de petrolíferos
Sistema troncal de ductos Jáltipan-Salina Cruz	Oleoducto, gasoducto, poliducto, ducto de petroquímicos y amoniaco ducto

*TM: terminal marítima. **MMb: millones de barriles.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b) y Sener (2018c).

- a) Refinería de Tula, Hidalgo, la más importante del país en cuanto a elaboración de petrolíferos en 2017, con 27.1% del total nacional (Pemex, 2018a). Su área de influencia abarca la zona más poblada e industrializada del territorio nacional.
- b) Estación de almacenamiento y distribución Venta de Carpio, en el municipio de Ecatepec de Morelos, México.
- c) Complejo Petroquímico Independencia, ubicado en San Martín Texmelucan, Puebla, con 1.3% de la producción de petroquímicos del país (Pemex, 2018a).
- d) Red troncal de oleoductos que se dirigen del Golfo de México a la refinería de Tula, Hidalgo, y a la de Salamanca, Guanajuato. El sistema de ductos bidireccionales de esta región suma una longitud de 204.1 km, cuyo grosor oscila entre 12 y 14 pulgadas de espesor (Sener, 2018a).

Su relevancia en cuanto a vulnerabilidad ante derrames de petróleo crudo desde oleoductos estriba en que los derechos de vía de Pemex cruzan las zonas industriales y urbanas más densamente pobladas del país. En las Tablas 1.5a y 1.5b se resume su infraestructura y características productivas.

Tabla 1.5b. Otra infraestructura de la industria petrolera en la Región Centro, 2017.

Infraestructura	Características
Estación de almacenamiento y distribución de Venta de Carpio	s/d*
Sistema troncal y regional de ductos	Oleoductos, gasoductos, ductos de gas LP y poliductos

*s/d: sin dato.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b).

Tabla 1.5a. Infraestructura para la producción de petrolíferos y petroquímicos en la Región Centro, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso	Porcentaje del total	Producción	Porcentaje del total
Refinería de Tula	315 Mbd*	19.4	213 Mbd	27.1
Unidad PQ** de Tula***	66 Mt****	0.5		
CPQ***** Independencia	287 Mt	2.3	118 Mt	1.3

*Mbd: miles de barriles diarios. **PQ: petroquímica. ***Sin producción desde 2008. ****Mt: miles de toneladas. *****CPQ: complejo petroquímico.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a; 2018b) y Sener (2018b).

Región Golfo Norte

Esta región comprende el estado de Tamaulipas. Incluye las siguientes instalaciones de la industria petrolera (Tablas 1.6a, 1.6b, 1.6c y 1.6d):

- a) Refinería de Madero, con una producción de petrolíferos de 6.2% del total nacional. Esta refinería abastece de productos petrolíferos a las áreas norte y centro de la costa del Golfo de México.
- b) TM de Madero, segundo puerto en importancia en el Golfo de México por los movimientos de cabotaje de productos petrolíferos y petroquímicos. Tiene una capacidad de 4.5 MMB, con una participación porcentual del total de la capacidad operativa de 4% y 12 tanques (Sener, 2018a).
- c) Red de oleoductos del sistema troncal que cruza su territorio procedente de Veracruz hacia la frontera con Estados Unidos y la refinería de Cadereyta, Nuevo León, con grosores que van de 10 a 24 pulgadas de diámetro (Pemex, 2018b).

Tabla 1.6a. Reservas de hidrocarburos totales y probadas en la Región Golfo Norte, 2017.

Regiones	Reservas de hidrocarburos totales (MMbpce)*	Porcentaje del total nacional	Reservas probadas (MMbpce)	Porcentaje del total nacional
Región Norte**	7,534	34.0	1,300	15.2
Total nacional	22 149	100.0	8 562	100.0

*MMbpce: millones de barriles de petróleo crudo equivalentes. **En la Región Golfo Norte se incluyen los datos del Activo Integral Burgos, el más importante de los cuatro que integran la Región Norte, productora de hidrocarburos.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.6b. Producción de gas natural de la Región Golfo Norte, 2017.

Infraestructura	Producción de gas natural (MMpcd)*	Porcentaje del total nacional
Región Norte		
Activo Integral Burgos	699	13.8

*MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a).

Tabla 1.6c. Infraestructura y producción de petrolíferos y gas natural de proceso en la Región Golfo Norte, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso (Mbd)*	Porcentaje del total nacional	Producción / Proceso	Porcentaje del total nacional
Refinería de Madero	190	11.7	49Mbd	6.2
CPG** Burgos			455MMpcd***	14.1
CPG Arenque			22MMpcd	0.7
Total CPG			477MMpcd	14.7

*Mbd: miles de barriles diarios. **CPG: complejo procesador de gas. ***MMpcd: millones de pies cúbicos diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a) y Sener (2018b).

- d) En los últimos quinquenios la puesta en operación de una gran cantidad de pozos productores de gas seco ubicados en la Cuenca de Burgos (Activo Integral Burgos), pertenecientes a la Región Norte de producción de hidrocarburos, ha contribuido a aumentar la producción de gas natural, aunque ha declinado desde 2016. Esta región concentra actualmente 13.8% de la producción total de gas del país (Pemex, 2018a). Para pro-

Tabla 1.6d. Otra infraestructura petrolera de la Región Golfo Norte, 2017.

Infraestructura	Número / Capacidad
TM* Madero	6 MMt**
Sistema troncal y regional de ductos	s/d

*TM: terminal marítima. **MMt: millones de toneladas.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b).

cesar el gas extraído, en la región se utilizan los Complejos Procesadores de Gas de Burgos y Arenque, este último anexo a la refinería de Madero, los cuales procesan 14.7% del gas del país (Pemex, 2018a).

Región Centro-Occidente

Esta región abarca los estados de Guanajuato, Jalisco y Michoacán, con ramales hacia Aguascalientes, Zacatecas y San Luis Potosí en la Región Centro-Norte. En ella se localiza la refinería de Salamanca, con 19.6% de la producción nacional de petrolíferos (Pemex, 2018a), la cual abastece de combustibles a las entidades señaladas. Una red de oleoductos de 150 km de longitud y un espesor comprendido entre 16 y 24 pulgadas (Pemex, 2018b) atraviesa la región. La infraestructura y las características productivas se incluyen en las Tablas 1.7a y 1.7b.

Tabla 1.7a. Infraestructura para la refinación de petróleo crudo en la Región Centro-Occidente, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso (Mbd)*	Porcentaje del total nacional	Producción (Mbd)	Porcentaje del total nacional
Refinería de Salamanca	245	15.1	154	19.6

*Mbd: miles de barriles diarios.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a) y Sener (2018b).

Tabla 1.7b. Infraestructura de distribución en la Región Centro-Occidente, 2017.

Infraestructura	Capacidad
Sistema troncal y regional de ductos	Oleoducto, gasoductos y poliductos

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b).

La vulnerabilidad de esta zona se deriva no sólo de la infraestructura petrolera, sino de los derechos de vía que cruzan por el corredor urbano-industrial del Bajío, con algunos ramales hacia el Centro-Norte, caracterizado por su alta densidad de población y su elevada concentración de empresas de la industria petroquímica secundaria y el subsector agroindustrial.

Región Noreste y Norte

Esta región comprende las entidades federativas de Nuevo León, Coahuila, Chihuahua y Durango. En ella se ubica la refinería de Cadereyta, en Nuevo León, que concentra 16.9% de la capacidad total de refinación y 16.5% de la producción nacional de petrolíferos. Su área de influencia se extiende a las regiones noreste y norte del país para el abastecimiento de combustibles. Por esta región cruza el oleoducto troncal que procede de la llanura costera del Golfo de México, el cual recorre una distancia aproximada de 125 km en la región para conectar con la refinería. Además, en el estado de Chihuahua se ubican las instalaciones de la Unidad Petroquímica de Camargo, que desde hace varios años se encuentra fuera de operación (Tablas 1.8a y 1.8b).

Otras regiones

Esta sección incluye cuatro regiones que poseen terminales marítimas o fronteras de recepción de productos petrolíferos y algunos poliductos para su distribución regional. No cuenta con oleoductos ni otras instalaciones petroleras:

Tabla 1.8a. Infraestructura para la refinación y la petroquímica en la Región Noreste y Norte, 2017.

Infraestructura	Capacidad de proceso	Porcentaje del total nacional	Producción (Mbd)*	Porcentaje del total nacional
Refinería de Cadereyta	275 Mbd	16.9	130	16.5
CPQ** Camargo***	333 Mt	2.7		

*Mbd: miles de barriles diarios. **CPQ: complejo petroquímico. ***Fuera de operación desde 2003.

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018a; 2018b) y Sener (2018b).

Tabla 1.8b. Otra infraestructura para la distribución de productos petroleros, 2017.

Infraestructura	Capacidad
Sistema troncal y regional de ductos	Oleoductos, gasoductos y poliductos

Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2018b).

- a) 9A. Sonora
- b) 9B. Sinaloa
- c) 9C. Campeche y Yucatán
- d) 9D. Baja California

Con base en lo expuesto, se recomienda analizar la vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos conforme a la secuencia en que fueron abordadas las regiones, que se presentaron por orden de importancia respecto a las instalaciones petroleras existentes en su territorio en sus diferentes modalidades, relacionadas a su vez con la presencia de oleoductos en los que pueden ocurrir derrames.

Capítulo 2. Evaluación de la vulnerabilidad de unidades espaciales

Oralia Oropeza Orozco,
Silke Cram Heydrich,
Pilar Fernández Lomelín
Irene Sommer Cervantes
Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, UNAM

Ma. Teresa Sánchez Salazar,
José María Casado Izquierdo
Departamento de Geografía Económica
Instituto de Geografía, UNAM

Componentes del riesgo

El marco conceptual está orientado a la preservación de los recursos naturales y servicios ambientales, y a la integridad de la población de una región, identificando las unidades espaciales más vulnerables a los efectos que pueden generar los derrames de hidrocarburos (petróleo crudo). Los componentes que integran dicho marco conceptual son riesgo, amenaza, vulnerabilidad (intrínseca y extrínseca), geosistemas, variables e índices, y análisis jerárquico (Figura 2.1).

A continuación, en las especificaciones conceptuales se describe el riesgo desde un enfoque ambiental, así como los elementos que lo determinan: la amenaza y la vulnerabilidad.

Riesgo

La definición de riesgo varía de acuerdo con el enfoque específico de trabajo y de cada una de las disciplinas involucradas en su estudio. En un sentido amplio, como señalan Narváez, Lavell y Pérez-Ortega (2009), el riesgo es consustancial a la existencia humana; evoca ideas acerca de pérdidas y daños asociados con los distintos ambientes naturales y esferas de la actividad humana. Por otra parte, desde un enfoque socioeconómico se asume que el riesgo es inherente a la idea de

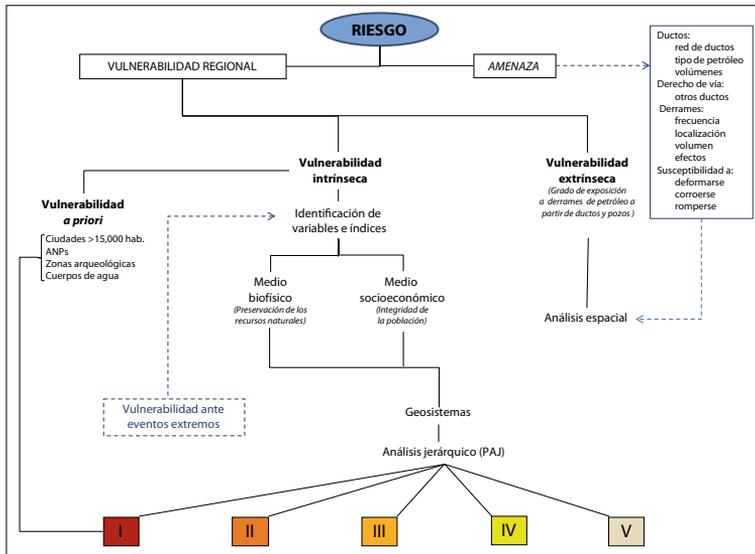


Figura 2.1. Marco conceptual y esquema general de trabajo para la determinación de la vulnerabilidad de unidades espaciales ante derrames de petróleo crudo a escalas geográficas medias. Fuente: Elaboración propia.

empresa y búsqueda de avance y ganancia en determinadas condiciones de incertidumbre (p. ej., los seguros catastróficos).

En este trabajo el riesgo se asocia al problema de los desastres; es decir, hace referencia a aquellas circunstancias o condiciones sociales en que la sociedad haya sido afectada de manera importante por el impacto de eventos de diverso origen (sismos, huracanes, inundaciones, explosiones, derrames, guerras, desplazamientos de población, crisis económicas, etcétera), cuyas consecuencias alteraron e interrumpieron su funcionamiento normal. En este tenor, se considera un riesgo particular respecto a un desastre o que anuncia un desastre futuro. Narváez, Lavell y Pérez-Ortega (2009) lo consideran como parte del riesgo global o total; éste, a su vez, incluye otros tipos que son tratados por diferentes disciplinas (economía, sociología, biología, etcétera), ejemplo de ello es el estudio acerca del riesgo financiero, de salud, tecnológico y de trabajo, entre otros.

De acuerdo con la clasificación de riesgos del Sistema Nacional de Protección Civil (CNR, 1986), el riesgo referido en esta investigación corresponde al “riesgo químico-tecnológico”, el cual, dadas las consecuencias del impacto, se ubica también como un “riesgo ambiental”, pues se concibe de forma integral al involucrar los sistemas naturales, sociales y económicos en su expresión espacial,

centrándose en la preservación de los recursos naturales y servicios ambientales, así como la protección de la población.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2002: 51), por su parte, ha desarrollado una guía para la Presentación del Estudio de Riesgo Ambiental Nivel 2: Análisis de Riesgo, en la que se define el riesgo ambiental como la probabilidad de que ocurran accidentes mayores que involucren a los materiales peligrosos que se manejan en las actividades altamente riesgosas, que puedan trascender los límites de sus instalaciones y afectar adversamente a la población, los bienes y al ambiente.

Este estudio es un requisito que debe acompañar a la manifestación de impacto ambiental cuando se trata de actividades altamente riesgosas.

Otra definición básica de riesgo ambiental es: “la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que afecta directa o indirectamente al medio ambiente” (Coepa, 2007). Se trata de la probabilidad de entrar en contacto con amenazas de diversa índole a las que pueden estar sometidos los elementos que conforman el medio ambiente, incluyendo el hombre y sus actividades.

Una de las nociones más generalizadas, y en la que parece haber consenso entre las diferentes disciplinas que abordan el tema, es que el riesgo de desastre debe expresarse en función de la probabilidad de ocurrencia, que a su vez se calcula considerando el peligro o la amenaza, por un lado, y la vulnerabilidad o sensibilidad del objeto amenazado, por otro, así como la capacidad de adaptación o resiliencia y de recuperación.

La amenaza se expresa, de igual manera, como probabilidad de ocurrencia; la vulnerabilidad es un índice o coeficiente que aumenta o disminuye la magnitud del riesgo (Cardona, 1993; Wilches-Chaux, 1993; 1998; Romero y Maskrey, 1993; USEPA, 1998). Esta concepción es la que ha prevalecido históricamente, principalmente en el ámbito de las ciencias de la Tierra, y pone énfasis en la amenaza o el evento físico detonador del desastre. Pero también existen otras nociones o definiciones de carácter social y económico que le dan mayor peso a los impactos y consecuencias probables, y se expresan de la siguiente forma: el riesgo de desastre es la probabilidad de daños y pérdidas futuros asociados con la ocurrencia de un evento físico dañino; es decir, el énfasis no se pone en la probabilidad de ocurrencia del evento físico como tal, sino en la vulnerabilidad (Narváez, Lavell y Pérez-Ortega, 2009). Esto último pone de relieve el enfoque de este trabajo, que le da mayor relevancia a la vulnerabilidad.

El riesgo de desastre se sostiene en dos tipos de factores: en el primero se encuentran los eventos físicos potencialmente dañinos (amenazas), y en el segundo está la vulnerabilidad (Narváez, Lavell y Pérez-Ortega, 2009). La existencia de

ambos tipos está condicionada por el grado de exposición de la sociedad y sus actividades, así como del ambiente, a los eventos físicos que potencialmente pueden resultar peligrosos. Así, el riesgo de desastre está determinado por la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad, si falta alguna de éstas, entonces no hay riesgo.

Amenaza

Existen numerosas definiciones y clasificaciones relacionadas con la amenaza, las más frecuentes aluden al origen o causa que la produce.

Boughton, Smith y O'Neil (1999) consideran la amenaza como cualquier agente físico, químico o biológico (de origen natural o antrópico) que puede inducir una respuesta adversa en alguna unidad previamente definida, tal como un ecosistema. En esta definición hay un juicio de valor, dado que el término "respuesta adversa" implica una connotación humana y supone conocer el estado del recurso antes de estar expuesto a dicha amenaza para poder evaluar el cambio.

Los derrames de petróleo a partir de la red de ductos de las empresas petroleras en México son considerados una amenaza antrópica (Wilches-Chaux, 1998; Narváez, Lavell y Pérez-Ortega, 2009) y se relacionan con la producción, el manejo y el transporte de sustancias y materiales peligrosos.

La red de oleoductos está sujeta a la influencia de factores naturales que pueden convertirse en verdaderos peligros (efectos hidrometeorológicos, como lluvias torrenciales provocadas por ciclones tropicales, y otras perturbaciones atmosféricas [nortes], inundaciones, sismos, vulcanismo e inestabilidad de laderas, entre otros), así como factores humanos (tiempo-edad de los ductos, falta de mantenimiento, perforación de ductos y extracción ilegal del combustible, que ocasionan de manera frecuente fugas y derrames de hidrocarburos) (Olivera-Villaseñor y Rodríguez-Castellanos, 2005; Blanno y Ruiz-Saucedo, 2007); pueden causar efectos adversos en la capacidad del sistema de proveer servicios ambientales y de salud, así como en el bienestar de los pobladores. Cabe mencionar que actualmente se ha incrementado la extracción ilegal de combustibles (petróleo crudo, gasolina, etcétera), lo cual ha generado numerosos y graves problemas a la sociedad (crimen organizado, violencia) y al ambiente (contaminación de suelo, agua y aire, explosiones e incendios).

Los ductos a campo traviesa son los sistemas principales que se utilizan para transportar petróleo y sus productos derivados, y aunque varios estudios declaran que son los más efectivos y ambientalmente seguros (CONCAWE, 2002; Dey, 2002; Dey *et al.*, 1998), son difíciles de configurar, ya que pasan a través de diversos tipos de terreno, desde campos de cultivo hasta bosques, de zonas urbanizadas a humedales o zonas desérticas, y de zonas montañosas a la costa y alta mar,

por lo que están sujetos a diversas condiciones del ambiente que pueden dañarlos. La República Mexicana cuenta con una extensa red de ductos terrestres y marinos para la recolección y el transporte de hidrocarburos, que se extienden a lo largo de la costa del Golfo de México y las principales zonas urbano-industriales del país (Sánchez Salazar y Martínez Laguna, 2010), por lo que cruzan, así, una amplia gama de sistemas ambientales.

Si bien el propósito de este trabajo no es evaluar la amenaza, debido a que se requiere información de difícil acceso que se considera confidencial, en la Tabla 2.1 se hace referencia a los aspectos o tipo de información necesaria para cuantificarla, tomada de fuentes nacionales e internacionales (Vías, 2005; Repsol, 2010; APPRA, 2014).

Los efectos adversos que tiene el petróleo en los organismos pueden ser por impregnación, por alteración de su hábitat o por toxicidad (USEPA, 1999), y lo que determina la magnitud de estos efectos es, sobre todo, la posibilidad de su dispersión en el ambiente, la cual depende del volumen derramado, y de las características del petróleo (p. ej., viscosidad) y del medio físico (p. ej., la estabilidad del terreno y la presencia de cuerpos de agua). Los factores anteriores se han tomado en cuenta para definir las variables y los indicadores propuestos en este trabajo. Aunado a lo anterior, la magnitud de los efectos depende de la vulnerabilidad del sistema receptor y de su capacidad de resistir o recuperarse del daño.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad de un sistema a sufrir daños por estar expuesto a una amenaza que ocasiona cambios en el ambiente y la sociedad, caracterizados por la capacidad limitada de adaptarse a esos cambios (Adger, 2006). Igual que en el caso de la amenaza, existen muchas definiciones de vulnerabilidad que dependen de la disciplina que la aborda, sin embargo, to-

Tabla 2.1. Variables necesarias para evaluar la amenaza de derrames a partir de ductos.

Variable	Características de la información necesaria
Ductos	Ubicación georreferenciada de la red de ductos, tipo de crudo que transporta, volúmenes.
Derecho de vía	Otros ductos.
Derrames	Frecuencia, localización, volumen, efectos.
Características de los ductos	Diámetro de los ductos; edad; susceptibilidad a deformarse, corroerse, romperse.

Fuente: Vías, 2005; Repsol, 2010; APPRA, 2014.

das presentan parámetros clave que permiten medirla o evaluarla, como el estrés al que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación o resiliencia. Esto último se refiere a la magnitud de un disturbio que puede ser absorbido antes de que un sistema cambie a un estado radicalmente diferente, así como a la capacidad de adaptarse a circunstancias emergentes (Folke, 2006).

Se asume que un ecosistema (u otra unidad espacial con las mismas funciones) es dinámico y variable a través del tiempo, pero dicha variación se ajusta a un equilibrio. El dinamismo y la variabilidad pueden presentar diferentes grados según el tipo de ecosistema, pero cada uno de ellos está caracterizado por un intervalo de variabilidad que, al ser rebasado, indica que el sistema tiene problemas para operar normalmente y, por tanto, es indicio de vulnerabilidad.

Evaluación de la vulnerabilidad: unidades de estudio

En este trabajo se aborda la vulnerabilidad desde un punto de vista regional (Smith, 2000; Smith, Tran y O'Neill, 2003; Smith *et al.*, 2008). Este enfoque, propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, es usado para estudiar la vulnerabilidad regional debido a que, por lo general, los derrames de hidrocarburos de ductos se originan en un punto de la red y, según las características específicas del petróleo (densidad, viscosidad, temperatura, etcétera), de las condiciones del terreno (suelo, pendiente, tipo de roca y uso del suelo, entre otras) y del tiempo que tardan en controlar el derrame, éste se dispersará (Parrot, 2009) y afectará una o varias unidades espaciales contiguas. Se utiliza en la región como unidad de estudio el geosistema, aunque, como ya se señaló, también se puede usar el paisaje u otras unidades.

La ventaja de este enfoque es que considera tanto los componentes biofísicos como los socioeconómicos que conforman la región geográfica (cuenca hidrográfica, municipios, etcétera) y sus relaciones espaciales, lo cual permite hacer los ajustes que se requieren para superar las limitaciones impuestas por la escala espacial adoptada (también la temporal), que repercuten en la generalización de los resultados y su interpretación. Además, la vulnerabilidad regional da una visión global de las unidades espaciales que potencialmente pueden ser afectadas si no se tiene en cuenta esta característica en la planificación del territorio.

Al considerar las diferentes unidades espaciales de estudio en la región, la evaluación no se basa sólo en variables aisladas, que miden un atributo o una propiedad directamente, sino que las integra en índices o indicadores ambientales que permiten calificar su estatus o condición (Jones *et al.*, 1997). Estos

índices e indicadores se han utilizado para evaluar condiciones como diversidad biológica, integridad de cuencas y estabilidad de las unidades territoriales o los paisajes (O'Neal *et al.*, 1997). Como resultado de su aplicación se obtiene un valor de vulnerabilidad por tipo de unidad espacial que permite compararlas y establecer prioridades para una mejor planeación de las labores de prevención o conservación. La metodología propuesta expresa la vulnerabilidad a través de unidades cartográficas en varias categorías, y proporciona una herramienta muy útil para establecer medidas de protección, preventivas o correctivas en una región (Jiménez-Madrid, Carrasco-Cantos y Martínez Navarrete, 2009).

Con el fin de lograr lo anterior, la propuesta de este trabajo para abordar la vulnerabilidad regional se basa en conjuntar la vulnerabilidad intrínseca, extrínseca, *a priori* y la relacionada con eventos extremos (Figura 2.1). Sin embargo, se enfatiza en la vulnerabilidad intrínseca y las otras sólo se describen brevemente.

Vulnerabilidad intrínseca

Como su nombre lo dice, es una condición intrínseca, propia del sistema, que considera los conductores de cambio o estresores que han actuado con anterioridad sobre él, los cuales determinan su resistencia y resiliencia a eventos futuros. Se refiere a un rasgo propio o inherente dado por las características o propiedades físicas, biológicas y socioeconómicas del sistema en el momento de la evaluación.

Varios autores han utilizado los atributos intrínsecos de un sistema para evaluar la vulnerabilidad ante diferentes fenómenos, por ejemplo, en estudios de contaminación de agua subterránea (Jiménez-Madrid, Carrasco-Cantos y Martínez-Navarrete, 2009; Pérez y Pacheco, 2004; Gárfias, Franco y Llanos, 2002; Daly *et al.*, 2002). También se han usado para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del suelo ante procesos de compactación (Ajayi *et al.*, 2010), la vulnerabilidad biológica intrínseca respecto al riesgo de extinción de especies de flora y fauna (Tambutti *et al.*, 2002) y la vulnerabilidad intrínseca de la condición humana en estudios antropológicos (Torralba, 2013). Villa y McLeod (2002) parten de la vulnerabilidad intrínseca y de la extrínseca para establecer la vulnerabilidad ambiental; definen la primera como un subcomponente relacionado con la salud y la integridad de los ecosistemas.

Las variables e indicadores utilizados en este trabajo se seleccionaron considerando los atributos más característicos del sistema que controlan la vulnerabilidad intrínseca del sistema que se estudia, y se procura brindar una explicación o efecto en función de la vulnerabilidad extrínseca.

Vulnerabilidad extrínseca

La vulnerabilidad extrínseca está dada por la presencia y cercanía de una amenaza específica y la factibilidad de una interacción entre el receptor (en este caso, una unidad territorial) y el agente que genera el daño (derrames de hidrocarburo a partir de la red de oleoductos de la industria petrolera); también se ha denominado vulnerabilidad específica (Jiménez-Madrid, Carrasco-Cantos y Martínez-Navarrete, 2009). En otras palabras, el grado (intensidad y magnitud) de exposición a una determinada amenaza definirá la severidad de los efectos adversos que puedan darse de acuerdo con la vulnerabilidad intrínseca del receptor.

Aunque el propósito de este trabajo no es estimar de manera detallada la vulnerabilidad extrínseca, debido a que no se tiene suficiente información acerca de la amenaza, se sugiere hacer su evaluación con un análisis espacial, el cual permite reconocer las relaciones y los patrones que existen entre los componentes de las unidades espaciales delimitadas y la red de ductos; estas relaciones dependen de la escala de trabajo. En otros términos, este análisis espacial ayuda a identificar la interacción entre la amenaza y los elementos que componen el medio biofísico y socioeconómico, la cual puede darse mediante relaciones de proximidad, orientación, adyacencia, coincidencia y conectividad, entre otras (Morales, 2009).

Las relaciones mencionadas también permiten evaluar el grado de exposición y, con ello, la vulnerabilidad extrínseca, para ello existen diversos programas comerciales, como ArcGis, o software libre como GeoSys_Explor (Parrot, 2012) y Density_V2 (Parrot, 2014), entre otros, que permiten analizar las características espaciales de una unidad de terreno específica (tipo, número, superficie total), las cuales son almacenadas en una base de datos (*p. ej.*, Microsoft Excel o alguna otra) y, de esta manera, generar una imagen con esa información.

Vulnerabilidad a priori

La vulnerabilidad *a priori* califica con anticipación ciertas unidades espaciales con una “muy alta vulnerabilidad”, determinada por su estructura y funcionamiento, así como por los efectos adversos considerables que pueden sufrir ante una amenaza.

Se definen como vulnerables *a priori* las siguientes unidades (Cram *et al.*, 2010):

- a) Localidades de más de 15 000 habitantes, con la finalidad de proteger a una población mayor ante cualquier amenaza.

- b) Áreas Naturales Protegidas (ANP), porque son áreas que se han delimitado para conservar el patrimonio natural de México y están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo.
- c) Zonas arqueológicas, de acuerdo con lo establecido en la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas (Semarnat, 2017), con el fin de proteger este patrimonio cultural de la humanidad.
- d) Cuerpos de agua superficiales, en términos de la rapidez con la que cualquier tipo de contaminante puede ser arrastrado y dispersado, magnificando la superficie afectada y los efectos adversos en los organismos, además de la dificultad de contener los derrames en estos ambientes.

Vulnerabilidad ante eventos extremos

Aunque se reconoce que los eventos extremos son importantes y deben incluirse en el análisis de la vulnerabilidad y en las variables e indicadores para evaluar la vulnerabilidad intrínseca, en este trabajo no se considera el efecto de otras amenazas, como huracanes, inundaciones, sismos e inestabilidad de laderas, entre otros, los cuales pueden crear sinergias o antagonismos que potencian la vulnerabilidad intrínseca; en la Figura 2.1 se presenta como vulnerabilidad ante eventos extremos.

La evaluación aislada de las amenazas que afectan un territorio es muy común, debido a la complejidad que representa hacer una evaluación múltiple, pero trae como consecuencia la subestimación del efecto que puede causar (Perles y Cantarero, 2010). El aumento de la peligrosidad acumulada trae consigo no sólo un incremento de la intensidad del impacto en el área receptora, sino, en algunos casos, también un aumento del área afectada (Perles, Gallego y Cantarero, 2006).

En este sentido y en relación con los derrames de petróleo, es necesario identificar qué otras amenazas podrían potenciar el efecto y seleccionar variables e indicadores adicionales para evaluar la vulnerabilidad intrínseca en un área determinada. Un ejemplo de lo anterior es cuando se presenta una amenaza que resulta en inundaciones, en el que se pueden incluir variables adicionales, como la presencia de llanuras susceptibles de inundarse por crecidas ordinarias y desbordes extraordinarios, donde los derrames de petróleo en el agua pueden dispersarse rápida y ampliamente, y afectar no sólo cuerpos de agua superficiales, sino todos los geosistemas asociados (Sommer, Oropeza y Cram, 2010; Cram *et al.*, 2010; Mendoza-Cantú *et al.*, 2011).

Criterios metodológicos para medir la vulnerabilidad

En esta sección se hace un breve recuento de los pasos a seguir para evaluar la vulnerabilidad.

El proceso para estimar la vulnerabilidad intrínseca se inicia con la elección de la unidad espacial (geosistema, paisaje, unidad de terreno, unidad operativa, etcétera) que se manejará en el análisis (en el ejercicio que se implementa en la Parte II de esta guía se elige el geosistema como unidad espacial); se continúa con la identificación y delimitación de los diferentes tipos que existen en el área de estudio (en ocasiones, cuando los tipos de unidades espaciales sean numerosos, podrán agruparse en atención al objetivo del estudio); se prosigue con la selección de las variables e índices que se utilizarán para la evaluación y, finalmente, se selecciona el análisis multicriterio para la integración de los resultados. Así, se obtiene la vulnerabilidad intrínseca global del área de estudio.

Para evaluar la vulnerabilidad extrínseca puede seleccionarse el trabajo con los polígonos que presentan una amenaza específica, en cuyas características se asienta puntualmente el valor de las variables o los indicadores seleccionados. Se hace un análisis multicriterio para la integración de los resultados y se estima la vulnerabilidad extrínseca. Finalmente, se establecen diversas categorías de vulnerabilidad en una zona con respecto a una amenaza determinada.

El Geosistema como unidad territorial de trabajo

Los geosistemas son las unidades territoriales o espaciales adoptadas en esta metodología, en función de las cuales se determina su vulnerabilidad frente a los derrames de ductos de petróleo. Son unidades homogéneas que se integran no sólo por su génesis y sus características biofísicas, sino también por los aspectos sociales y económicos que las identifican, particularmente los referidos al uso del suelo dominante en cada unidad. La delimitación de los geosistemas se detalla en el Capítulo 3, Sección 3.2.

Variables e índices

Las variables e índices de vulnerabilidad pueden definirse como todas aquellas características medibles que establecen una relación causa-efecto lógica o intuitiva con la amenaza. Para fines de este estudio, las variables e índices son los rasgos de las unidades espaciales actuales, apreciables o visibles en los mapas temáticos, imágenes satelitales o fotografías aéreas del área de estudio a la escala de trabajo seleccionada (1:250 000-1:50 000), y en información estadística existente y ac-

cesible en diversas bases de datos, que se complementa con un levantamiento de campo preliminar.

Una variable es una medición directa de una característica, por ejemplo, la pendiente, el área, la distancia de un punto a otro, etcétera, en tanto que un índice o indicador es una relación de variables y normalmente carece de unidades, como el índice de rezago social.

Una vez seleccionadas y medidas las variables y los índices, se establecen categorías a partir de los valores máximo y mínimo obtenidos para el conjunto de geosistemas a evaluar. Normalmente se recomienda trabajar con tres categorías (alto, medio, bajo) o cinco (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo); lo cual facilita la percepción visual y la elaboración de mapas con esa información, visualizando cada categoría con una gama de colores (Gómez-Escobar, 2004). Los valores límite que definen cada una de las categorías elegidas reciben el nombre de *criterio*. En esta guía se eligieron cinco categorías de vulnerabilidad: muy baja (1), baja (2), media (3), alta (4) y muy alta (5). Los criterios para la selección de variables e índices, así como los recomendados, se explican en el Capítulo 4, secciones 4.1 y 4.2.

Análisis jerárquico

Después de calificar cada geosistema conforme a los criterios de las variables seleccionadas, se elige y aplica un método de integración que establece la secuencia de reglas lógicas para el cálculo de un índice de vulnerabilidad por cada geosistema. Esto permite compararlos y ordenarlos de mayor a menor vulnerabilidad. El procedimiento para llevar a cabo este análisis se explica en el Capítulo 5 de este documento.

Capítulo 3. Identificación y delimitación de unidades territoriales

Mario Arturo Ortiz Pérez

Oralia Oropeza Orozco

Irene Sommer Cervantes

Departamento de Geografía Física

Instituto de Geografía, UNAM

La determinación de la vulnerabilidad ambiental por derrames de hidrocarburos se establece a partir de unidades espaciales o territoriales de análisis. Como primer paso se identifican y delimitan cartográficamente las unidades que muestran una homogeneidad relativa en la interacción de los procesos naturales y socioeconómicos que ocurren en ellas. Así, el carácter integral de estas unidades facilita su evaluación y manejo.

En los análisis o diagnósticos ambientales para la planificación o el ordenamiento territorial se manejan diversas unidades de integración: paisaje, unidad homogénea, unidad espacial, unidad de terreno, unidad ambiental, unidad operativa (u operacional), unidad funcional y geosistema, entre otras (González-Otero, 1994; IGAC, 1996; Gómez-Orea, 2007; Bocco *et al.*, 2010). En todas ellas convergen e interactúan múltiples factores que, en conjunto, conforman el gran sistema o complejo territorial. En función de la delimitación de estas unidades se valoran sus bienes y servicios ambientales, se establece la vocación natural del suelo y se identifican las amenazas a las que están expuestas, así como la degradación y los impactos que las afectan (Gómez-Orea, 2007). Con ello se estima su grado de vulnerabilidad y los riesgos de origen natural y antrópico a los que estas unidades están sujetas.

Aunque el evaluador tiene la libertad de elegir la unidad espacial que más le convenga, en esta guía se propone utilizar, por un lado, las unidades de terreno delimitadas de acuerdo con las formas del relieve y los procesos geomorfológicos y, por el otro, las unidades denominadas geosistemas, que expresan las relaciones más dinámicas de los procesos naturales y socioeconómicos que ocurren entre

ellos a través de su expresión espacial caracterizada por la dominancia de un paisaje natural o del uso del suelo.

Unidades de terreno

El estudio del paisaje o de cualquier unidad espacial seleccionada se debe completar con el entendimiento de los problemas de degradación y vulnerabilidad. En este contexto es necesario comprender al ser humano como una de las principales fuerzas que transforman el paisaje, porque éste constituye el soporte de sus actividades y el escenario de su historia. La actividad humana en el medio natural ha ocasionado una pérdida sostenida de las propiedades del paisaje, las cuales son garantía del funcionamiento de los mecanismos de autorregulación y regeneración del sistema natural; si estas propiedades son alteradas, se reduce o se pierde la capacidad del medio para captar, concentrar, almacenar, asimilar y transferir materia y energía. Dicha pérdida se traduce en una mayor fragilidad e incapacidad del sistema para afrontar perturbaciones, amenazas o estresores al menguar paulatinamente la producción de bienes y servicios ambientales, y transitar por diferentes estados de degradación o condiciones de vulnerabilidad hasta llegar a una completa disfunción.

La selección e interpretación de claves analíticas que reflejen la condición en que se encuentra un paisaje es una forma práctica de entender y estudiar los procesos de vulnerabilidad. Para ello se requieren conocimientos fundamentales acerca de geomorfología y fisiografía; uno de los objetivos de tales disciplinas es establecer la estructura espacial, es decir, los arreglos y la distribución del relieve mediante el análisis de la localización, extensión, exposición y disposición de los elementos físico-geográficos, así como de la ubicación e interpretación de gradientes espaciales de diversa dimensión, naturaleza y magnitud, como la pendiente, la humedad, la temperatura, las mareas, etcétera.

Identificación de unidades de terreno

El entendimiento e interpretación de los procesos funcionales que interactúan con las formas del relieve que rigen en cualquier subdivisión territorial que se adopte para un trabajo específico (en este caso, las unidades de terreno y los geosistemas), se abordan de mejor manera si se visualizan en función de la cuenca hidrográfica mediante la interrelación del relieve, desde las cumbres (divisorias de agua) y laderas superiores, medias y bajas, que cumplen diversas funciones, hasta el nivel base en las llanuras. Además, la red de drenaje es el subsistema más im-

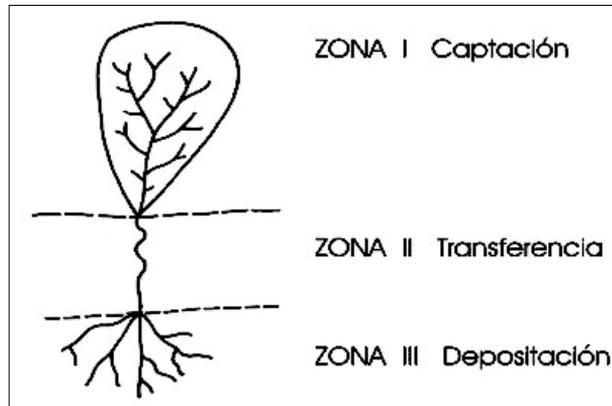
portante por su papel en el traslado de energía, materia e información. La Figura 3.1a muestra las zonas funcionales de una cuenca hidrográfica.

El sistema fluvial puede ser considerado como un sistema en cascada en el que los materiales y la energía fluyen a través de cada una de las zonas con diversas condiciones. De este modo, las variables que intervienen tienen un arreglo en secuencia que refleja el mayor grado de dependencia o control conforme se desciende en altitud.

El paisaje geomorfológico se subdivide en las siguientes clases de relieve que conforman una cuenca:

- Elevaciones mayores
- Laderas de montaña
- Planicie inclinada de transición
- Planicie con elevaciones menores
- Morfología mesiforme
- Planicie de tierras bajas
- Sistema fluvial

A continuación se describen brevemente sus características.

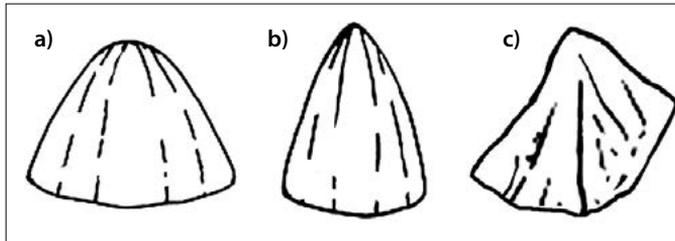


Zona I: corresponde a la vertiente superior alta de donde se deriva la fuente de agua y sedimentos. Zona II: domina la transferencia y transporte de materia (agua y sedimentos). Zona III: corresponde a la acumulación de sedimentos, producto de la erosión y transporte de las zonas I y II.

Figura 3.1a. Zonas funcionales de una cuenca hidrográfica. Fuente: Tomado de Schumm (1977).

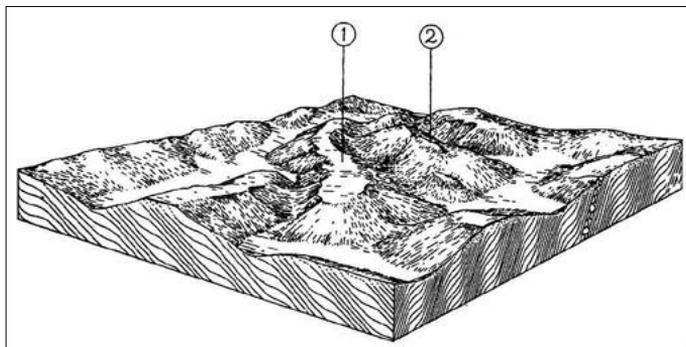
Elevaciones mayores

Nivel de cumbres. Corresponde a las laderas de mayor elevación que sostienen una cima. De acuerdo con su modelado, se reconocen las cimas aisladas de forma dómica, cónica o piramidal (Figura 3.1b); cuando se trata de una sierra, las cumbres conforman las denominadas cimas de lomo y el parteaguas se proyecta con un perfil transversal en forma de arco convexo o de domo alargado mesiforme (Figura 3.1c). De acuerdo con la geometría de su convexidad, el interior o centro de la cima está, generalmente, poco modelado. Si conserva una superficie plana o mesiforme, la cima marcará la existencia de una superficie de denudación; también puede hallarse coronada por una litología de roca dura.



a) Dómic. b) Cónica. c) Piramidal

Figura 3.1b. Perfil de las cimas aisladas. Fuente: Elaboración propia, modificado de Pedraza (1996).



1) De lomo en arco convexo 2) De lomo con superficie mesiforme con roca dura.

Figura 3.1c. Perfil de las cimas de lomo. Fuente: Modificado de Brunt (1967, en Smith, Paron y Griffiths, 2011).

Superficie de divisorias (parteaguas). Esta subclase se refiere a los terrenos elevados sostenidos y comprendidos entre las laderas de dos sistemas fluviales. Al igual que las cimas, estos terrenos pueden presentar una superficie convexa o plana.

Laderas de montaña

Las laderas de montaña, también llamadas vertientes o flancos, se refieren a los lados o costados de una cadena montañosa o elevación individual. Así, las laderas son superficies inclinadas formadas por la conexión dinámica entre el parteaguas y el fondo, con las estribaciones de elevaciones menores, o con un valle o una llanura.

Desde un punto de vista funcional, las entradas de energía y materia al sistema de laderas provienen de la meteorización, que es producto del clima y los procesos biológicos. Las salidas del sistema se realizan a través de la red fluvial. La función esperada de un sistema de ladera es la evacuación de las rocas y escombros preparados por la meteorización y la descarga de los elementos en solución o suspensión a través de los cursos de agua.

El balance de energía y materia que entra, más lo que hay en tránsito y lo que sale, se encuentra regulado por la acción de los procesos de denudación y la resistencia de los materiales propios de la ladera. De acuerdo con White y Myers (1994), en la morfología de las laderas existen varios indicadores visibles para establecer las relaciones que existen con este balance, tales como la forma de la pendiente (el ángulo del perfil de la ladera o declive, la geometría de los contornos de la superficie de la ladera, y la profundidad y disposición de la regolita), y con los procesos que operan sobre ellas, herencia de los procesos que operaron en el pasado y que aún ejercen su influencia en la actualidad, al dejar una huella con información trazable.

La organización espacial de las laderas es importante porque refleja la eficiencia de la red fluvial en términos de la energía y la materia que circulan a través del sistema de cursos de agua, los cuales se diferencian espacialmente por su disposición y localización. La pendiente de cada trecho se establece según el orden de los cursos, que a su vez está determinado por las condiciones impuestas tanto por el tramo de aguas arriba, como por el nivel de base aguas abajo. La eficiencia de la red fluvial depende por completo de la disposición del sistema de laderas, es decir, de sus diferentes alturas, geometrías y pendientes; éstas se hayan relacionadas con la disposición y la distribución del relieve, los materiales geológicos constituyentes y los procesos. Este haz de relaciones se comporta de forma sistémica, así, la alteración de cualquier componente principal repercutirá en la integridad de los componentes a través de toda la cuenca.

Dentro de las zonas funcionales de una cuenca, las laderas pueden corresponder a las siguientes subdivisiones:

Talud superior. Es una zona de recarga donde se concentra gran parte del caudal líquido. El talud superior se considera una zona productora de agua, sobre todo en cuencas con climas templados. Se caracteriza por contener los terrenos de mayor altitud, con declives fuertes o laderas pronunciadas y suelos delgados, y porque ahí ocurren las mayores precipitaciones. Las pendientes de los ríos que conforman la red fluvial son pronunciadas y, por tanto, las corrientes responden rápidamente a las tormentas, formando confluente caudalosos. Cuenta, además, con ríos de valles encajados y profundos con la capacidad adecuada para desalojar de manera rápida y eficiente el agua y los sedimentos.

En esta parte de la cuenca domina el relieve rocoso, y si la mayoría de las rocas no está fracturada, se trata del emplazamiento de roca firme masiva e impermeable. Se espera entonces una contribución insignificante a las aguas subterráneas y al flujo subsuperficial, no así al flujo superficial. Cuando, por el contrario, se trata de terrenos fracturados o permeables, este talud cumple con la función natural de mantener la zona de recarga o abastecimiento, y de circulación interna o infiltración, así como de escurrimiento superficial, para cubrir las necesidades del gasto ecológico (que asegura la capacidad de autorregulación del sistema ripario).

En esta zona predominan la denudación por erosión y la destrucción de tierras. La mayor parte de los sedimentos y escombros derivan de esta parte de la cuenca.

*Talud intermedio.*¹¹ La porción del talud medio de la cuenca tiene, por una parte, los atributos de funcionamiento de la porción superior (abastecimiento) y, por la otra, los de una zona transmisora que conecta los principales tributarios de órdenes mayores con el colector principal en la dirección convergente. Prácticamente su gasto o caudal de entrada es muy semejante al escurrimiento de su salida hacia la parte baja.

Talud inferior. Este talud se comporta de manera distinta al de la zona alta. Generalmente se caracteriza por contar con zonas más pobladas, estar densamente cultivado, tener vegetación natural escasa y ríos con bajos gradientes hidráulicos, así como una reducción sensible de la energía de la erosión; los suelos

¹¹ En las cuencas no es una norma encontrar de forma clara la zona intermedia. Muchas veces se sustituye por la zona baja o incluso pueden faltar las características del talud inferior y remplazar la zona de talud o ladera baja con los atributos de la zona de talud de la ladera intermedia, esto se decide en el momento de aplicar las variables que intervienen en su modelado.

son más profundos y con mayor posibilidad de infiltración, pero con peligro de saturarse. El paisaje puede ser remplazado por un relieve bajo de acumulación sedimentaria, que puede tener problemas de azolves. También puede estar sujeto a las inundaciones, sobre todo si existe alteración de la vegetación en la porción alta de la cuenca.

Planicie inclinada de transición

La planicie inclinada de transición está representada por las rampas o cuestas de piedemonte y forma usualmente una superficie acumulativa de sedimentos derivados del sistema fluvial en la salida del frente montañoso. Su morfología se origina por la fusión lateral de abanicos aluviales, que tienen un perfil convexo hacia arriba, la mayoría de las veces con inclinación variable entre 6° y 18° como máximo.

Una zonificación se reconoce a lo largo del perfil longitudinal de la planicie inclinada, la cual incluye los siguientes sectores:

Proximal. Llamada también apical, contigua a las laderas, se caracteriza por ser la inflexión donde se interrumpe el flujo concentrado del escurrimiento, y se convierte en una escorrentía difusa y laminar. Constituye la zona formada por los depósitos de desborde o derrames de abanicos aluviales de fragmentos gruesos.

Central. Se caracteriza por una amplia variedad de formas elementales, cada una con una alta homogeneidad interna, sin perder la interconexión clara y evidente entre ellas, dada por los flujos de desbordes por medio de abanicos aluviales. El flujo se dirige hacia las porciones bajas de las depresiones de inundación ubicadas entre bordos.

Distal. El sector distal o frontal consiste en amplias formas de acumulación sedimentaria. Su estructura espacial se halla surcada en un arreglo distributivo de canales de trayectoria cambiante y efímera, que pasan de una configuración trenzada a meandros, y rematan en extensos abanicos aluviales frontales (los más alejados de la fuente) formados por los desbordes, entre los cuales se extienden depresiones sujetas a inundación de manera marginal (Figura 3.1d).

Planicie con elevaciones menores

La planicie con elevaciones menores es el resultado de la evolución de un paisaje que sufrió destrucción de tierras debido a un cambio de nivel base de erosión (alrededor del cual termina la erosión e inicia la acumulación), por efecto de movimientos tectónicos o del cambio de las condiciones climáticas, incluso por actividad volcánica, en donde las colinas o las lomas quedan

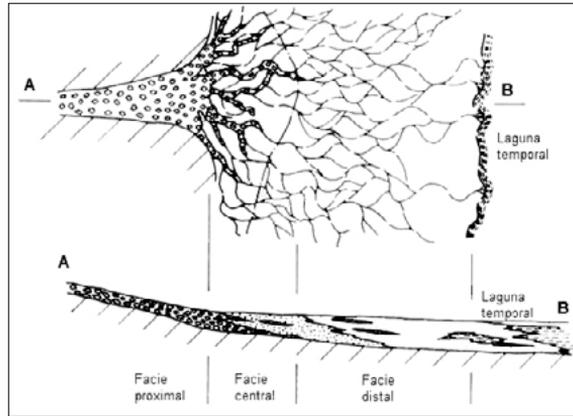


Figura 3.1d. Zonificación de una cuesta de piedemonte que ilustra la configuración de los arroyos y la repartición del material según su calibre, del más grueso al más fino conforme a su textura. Fuente: Águeda *et al.* (1983).

como testigos remanentes y residuales. Se identifican las siguientes clases de planicies:

Con colinas dispersas. Superficie llana interrumpida por la individualidad de colinas dispersas o en un arreglo más cerrado (Figura 3.1e).

Con lomeríos. Superficie llana en la cual emergen elevaciones encadenadas que forman un arreglo de lomos, ya sean abiertos o cerrados según sea la amplitud horizontal entre ellos (Figura 3.1f).

Ondulada e irregular. Superficie que tiene elevaciones suaves y depresiones con escasa profundidad (Figura 3.1g).



Figura 3.1e. Planicie con colinas dispersas.

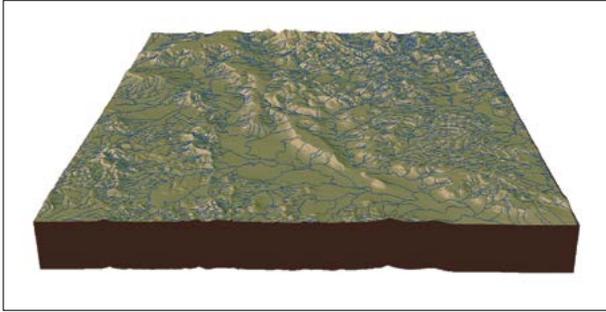


Figura 3.1f. Planicie con lomeríos. Fuente: elaboración propia con base en el MDT a partir de las curvas de nivel de INEGI escala 1: 50,000.



Figura 3.1g. Planicie ondulada e irregular.

Morfología mesiforme

La morfología mesiforme (altiplano-mesa o pilares) consiste en una superficie más o menos plana, delimitada por escarpas o laderas, donde predomina la erosión fluvial. Está conformada por terrenos altos de superficie plana u ondulada con diversidad de estilos, de estructura tabular sedimentaria o de material volcánico; incluso puede presentarse a manera de cuevas bordeada por barrancos (Figura 3.1h).

Es posible disgregar el relieve mesiforme en cuatro subclases: a) sector interno, b) sector de borde periférico de transición, c) talud de escarpa superior y d) talud inferior (Figura 3.1i).

Sector interno. Este sector corresponde a la superficie de denudación que conserva los atributos originales de la geoforma de la que se deriva. En esta superficie domina el escurrimiento interno o vertical y puede presentar una disección escasa, pero siempre conserva el nivel remanente de la superficie de denudación original. También puede estar representado por una roca

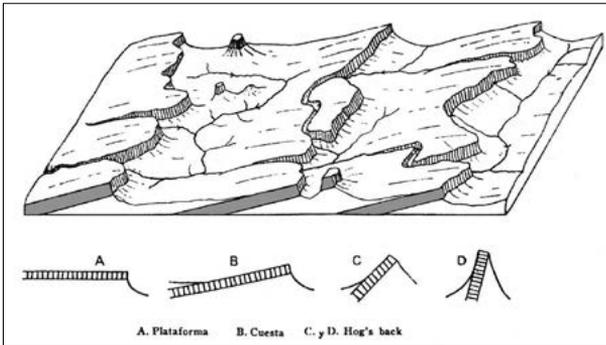


Figura 3.1h. Esquema idealizado de la evolución de un relieve mesiforme sujeto a erosión, con pérdida de la superficie original en los bordes. Fuente: Guerra (1980).

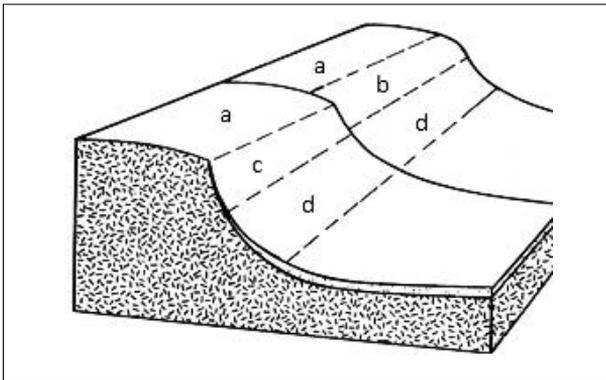


Figura 3.1i. Esquema de un relieve mesiforme. Fuente: elaboración propia con base en Ruhe (1975), citado en Zinck (2012).

dura que conserva la superficie original, ya sea de basalto, conglomerados o silicificados.

Sector de borde periférico de transición. Este sector, también conocido como talud de contorno mesiforme, tiene una superficie de geometría ligeramente convexa, con dominio de la percolación y la reptación (*creep*) del suelo.

Talud de escarpa superior. Este sector representa el frente de caída libre por efecto de la fuerza de gravedad de procesos rápidos, pero ocasionales, y de caída de agua. Presenta procesos de remoción en masa por desprendimiento de bloques. En los taludes superiores de menor pendiente puede haber una fuerte disección.

Talud inferior. El talud inferior representa la superficie inclinada de acumulación de sedimentos coluviales (influencia de la gravedad), deluviales (lavado superficial del suelo que se deposita al pie de la ladera) y proluviales (depósitos de torrentes a la salida del frente montañoso o de las laderas) sujetos, a su vez, a la reptación del suelo. Es una zona con potencial de corrimiento de tierras.

Planicie de tierras bajas

Las planicies de tierras bajas, como su nombre lo indica, son terrenos bajos y planos formados por la acumulación de material. Pueden ser, según su origen, aluviales, fluviales, de desborde, costeras-deltaicas, costeras-lacustres o costeras-eólicas. Son de naturaleza muy distinta entre sí, por lo que se requiere diferenciarlas por su génesis, ya que en algunas su estructura espacial se relaciona con el flujo del escurrimiento, mientras que en otras no existe liga alguna con una corriente fluvial.

La interpretación de los elementos geomorfológicos de estas planicies se asocia comúnmente a una corriente fluvial y a su planicie circundante. El lecho ordinario de la corriente fluvial, limitado por los diques naturales o bordos de las riberas del propio río, son los elementos de mayor altura en las planicies. Es común que se asocien brechas o cercenaduras que cortan los bordos en el momento de las avenidas. Dichos diques actúan como vertederos que perduran durante los desbordes del río, formando en el costado del bordo un abanico de explayamiento atrás del vertedero, construido con los sedimentos de crecida y los arrancados del bordo (Figura 3.1j).

Las depresiones de inundación corresponden a las zonas más bajas y retiradas de la corriente, situadas entre los diques naturales. Al ser un área deprimida endorreica, esta planicie es el receptáculo de los desbordes y la precipitación

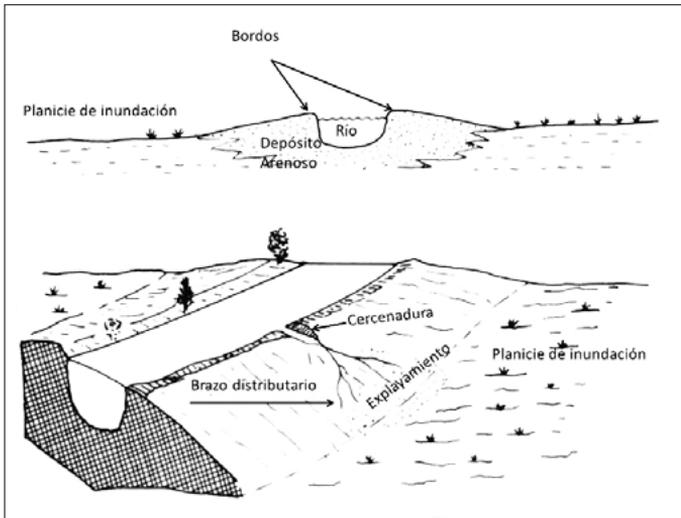


Figura 3.1j. Bordos altos de una corriente fluvial, uno de los cuales es cortado por una brecha (cercenadura) que actúa como vertedor de sedimentos y forma un abanico de explayamiento. Fuente: Fairbridge (1968).

pluvial, y queda inundada una gran parte del año. Constituye una zona de baja energía física donde los sedimentos finos se asientan y, por ende, el drenaje no es óptimo. Los lechos abandonados resultan de los cambios del curso fluvial y, al cortar sus propios meandros, se presentan como lagunas alargadas que se llenan de turba y sedimentos finos.

Dentro de las planicies de tierras bajas se pueden encontrar las siguientes subclases:

Planicie aluvial de inundación. Se genera debido a la construcción de los depósitos aluviales recientes y actuales de una corriente fluvial, como consecuencia de la pérdida de la capacidad de transporte de sedimentos del río durante el estiaje, o cuando los cursos tributarios llevan más material hacia la corriente colectora principal. Esta pérdida de potencia está relacionada con una disminución de la velocidad debido a: 1) un cambio de pendiente menor, 2) la presencia de obstáculos, como bancos aluviales propios de la corriente, que diseminan el escurrimiento al encontrar patrones acumulativos de corrientes distributivas y de lechos trenzados, (anastomosados), 3) la pérdida del escurrimiento por el proceso de arriísmo (carencia de corrientes fluviales), debido a la infiltración y evaporación inducidas por la retención de agua en las represas, y 4) sequía, receso de lluvias y tormentas o abatimiento de aguas subterráneas.

El sello distintivo de esta subdivisión de las planicies de tierras bajas es que los bordos de las riberas están limitados en altura, y la corriente se acerca al borde de la ribera a una distancia aproximada de un metro, por lo que, como se dice, el flujo va casi a pleno bordo o muy cercano al borde de la ribera, condición que facilita un comportamiento de trayectoria libre para divagar en la planicie.

Se identifican terrazas de inundaciones bajas y amplias que se disponen de acuerdo con el régimen de crecidas en las siguientes categorías,¹² según Trestman (1964) y Tricart (1960), citados en Meyerink (1970):

1. Fase de niveles bajos y medios. Los niveles coinciden o se aproximan al valor del escurrimiento medio anual. Por ser sólo un valor numérico del caudal, al ponderar los valores altos y bajos del gasto, no podemos esperar una clara indicación en las características del canal; sin embargo, se puede observar que en la mayoría de los casos los caudales medios cubren un tercio del lecho ordinario (Leopold, Wolman y Miller, 1964). Esta fase corresponde a la de estabilidad del cauce.

¹² Se usa esta clasificación modificada de acuerdo con las observaciones de los autores.

2. Fase de niveles altos. Los niveles corresponden a las crecidas ordinarias y se reconocen dos modalidades: a) escurrimientos con flujos a pleno bordo o muy cerca del nivel de contención del lecho ordinario, y b) de desborde, que sobrepasan las riberas del lecho ordinario e inundan periódica o estacionalmente (cada año o una o más veces cada dos años). La fase de niveles altos ordinarios es de periodos de retorno estacional muy corto y de frecuencia mayor.
3. Fase de desbordes extraordinarios. La avenida de agua rebasa el nivel de las riberas altas e inunda esporádicamente el lecho mayor excepcional o la llanura alta de inundación. Es la menos frecuente, con periodos de retorno comprendidos entre 2 y 10 años.
4. Fase de desbordes excepcionales de baja susceptibilidad. Ésta tiene periodos muy largos de retorno (100 años o más). Inunda casi toda la planicie y, desde luego, todas las terrazas de inundación.

Planicie fluvial confinada. Esta subclase hace referencia a una condición en la que el fondo del lecho fluvial corre por debajo de la planicie, la cual, a su vez, corre de forma encajada y delimitada dentro de un relieve de mayor altura. Se caracteriza porque en el transcurso de su evolución ocurre la incisión del curso, abandonando lechos de cauce a diferente altura, conocidos como *terrazas* que, por su disposición, se clasifican en las siguientes subunidades de terreno: 1) terraza alta, 2) terraza media, 3) terraza baja y 4) superficie de planicie palustre-lacustre (depresiones inundables).

Las terrazas (Figura 3.1k) son el resultado de las fases de disección por cambios de niveles de base debidos a desplazamientos tectónicos, fases u oscilacio-

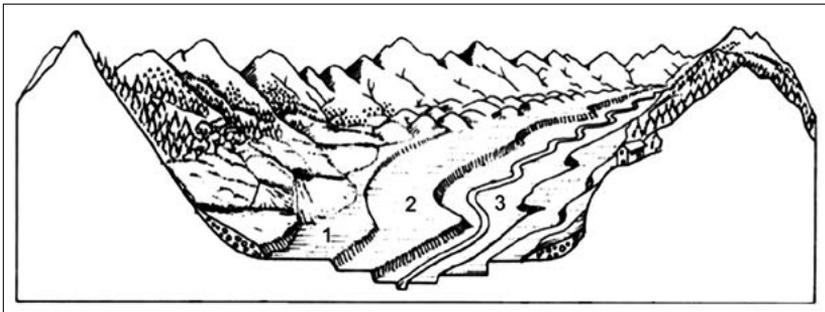


Figura 3.1k. Planicie fluvial confinada con tres fases de incisión, considerando el lecho del cauce en el nivel más bajo de la incisión fluvial actual: 1) alto, 2) medio y 3) bajo. Fuente: Zinck (2012).

nes de un cambio climático, o variaciones propiciadas por cambios del nivel del mar mediante transgresiones y regresiones marinas. También pueden originarse debido a modificaciones del régimen del escurrimiento por el control de obras hidráulicas.

Planicie fluvial de desborde. El lecho del cauce se encuentra por arriba de la planicie de inundación, y por ello hay un mayor uso de la tierra y colonización de la vegetación de galería. Las subunidades que pueden identificarse en esta planicie son los diques naturales de los bordos o resaltes y los costados de los bordos en declive hacia la llanura de inundación, limitados por terrazas (Figura 3.11).

Planicie de delta. Se distingue porque la carga de los sedimentos aluviales debe ser abundante a fin de edificar, a partir de la desembocadura, la planicie acumulativa, con un proceso de expansión y de avance hacia el mar en la medida que crece su formación por relleno. Sobre la planicie de tierras bajas esta subclase participa con los elementos fisiográficos de cualquier llanura costera y fluvial, pero su configuración y comportamiento dependen también de la acción marina de la costa, debido a que se modifica la expresión de la fisonomía en función de la energía de las olas, la dirección de la deriva litoral, los vientos dominantes y la magnitud y régimen de mareas. Los deltas son el resultado del balance entre energía, materia e información (EMI) fluvial y las fuerzas marinas. Pueden tener forma arqueada o cónica, en cúspide, de brazos digitados, etcétera (Figura 3.1m).

Planicie costera de acumulación. Conocida también como planicie de nivel base. Son tierras bajas sujetas a una sedimentación marina o mixta fluvio-marina. Se asocian a ríos autóctonos (de fuente cercana) que al reconocer su nivel base depositan los sedimentos. Una vez que se acumulan en la zona costera son reelaborados por la energía marina.

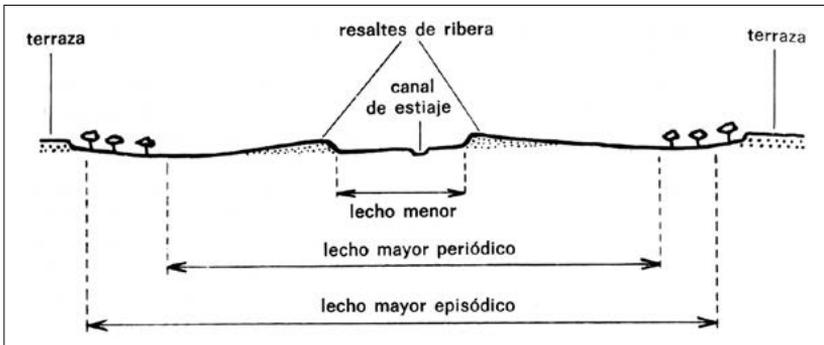


Figura 3.11. Zonación de las subunidades de la planicie fluvial de desborde en función del fenómeno de inundabilidad. Fuente: Coque (1984).

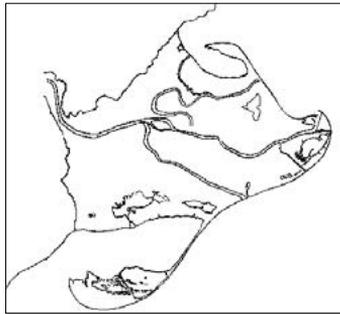


Figura 3.1m. Planicie de delta en cúspide con barras laterales formadas por corrientes de playa. Fuente: Modificado de Molinet Modificado de Molinet Col, V. s/a.

Planicie lagunar-costera. Resultan de la transición de la interfase tierra-mar como planicies de inundación de marea (marisma), que se encuentran resguardadas por una costa de barrera (isla barrera), en donde las corrientes litorales redistribuyen el sedimento, formando costas lineales con barras y playas paralelas a la línea de costa, que constituyen un filtro de amortiguamiento ante las fuerzas del océano (Figura 3.1n).

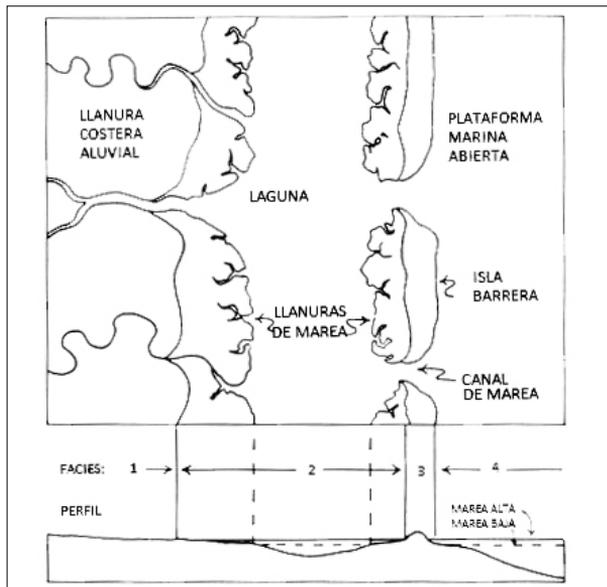


Figura 3.1n. Planicie de inundación y planicie lagunar-costera. 1) Llanura costera aluvial, 2) Llanura de mareas, 3) Barras, 4) Zona de influencia de mareas. Fuente: Selley (1976).

Planicie costera eólica o de campos de dunas costeras. La remoción por el viento cargado de material se deposita formando campos de dunas, mantos de arena y acumulación de loess, material fino limoso obtenido del transporte eólico distante a través de una selección textural (sorteamiento perfecto).

La planicie costera de acumulación eólica resulta de la interacción de los siguientes elementos:

- Presencia abundante de material clástico suelto o poco cohesivo.
- Escasa vegetación.
- Periodos cuando el material clástico esté seco.
- Existencia de un fetch (longitud rectilínea máxima de una gran masa de agua superficial).

Planicie de cordones de playa. Se forma con el abastecimiento abundante de sedimentos de acumulación litoral reelaborados por la incidencia oblicua del oleaje, los cuales generan corrientes de deriva litoral que sedimentan y aprovechan los fondos someros y el régimen micromareal para edificar barreras arenosas de playa sucesivas.

Sistema fluvial

La palabra “fluvial” se aplica a formas del relieve y procesos de erosión y acumulación que se producen por el escurrimiento superficial (Lugo, 2011), como ríos y arroyos. Los cauces fluviales pueden zonificarse según los siguientes aspectos (Rosgen, 1994):

- Por su gradiente de declive, de acuerdo con las características de calibre del material de la carga de fondo.
- En función del grado de sinuosidad, en la relación que guarda el lecho de anchura-profundidad.
- Por el grado de disección vertical y el tipo de confinamiento de la corriente.

Así, se clasifican y distinguen varios tipos morfológicos de valles y cauces, los cuales se diferencian desde quebradas y valles de montaña, hasta los barrancos y campos de cárcavas.

En el sistema fluvial pueden encontrarse los siguientes tipos de valles predominantes:

Valles erosivos de montaña. Estos valles corresponden a las formas originadas por las corrientes que se despliegan / extienden en declives de cauces mayores o bien desarrollados, donde el gradiente de pendiente es $>10\%$ y representa la categoría más alta catalogada como “muy empinados”. Estos valles son profundos, usualmente mayores a 100 m de profundidad, con trechos de paredes casi verticales (cañones) o con perfiles transversales en “V”. También se asocian a pendientes de relieve caracterizadas por laderas inestables, con evidencias de desprendimiento, debidas a la existencia de escombros gruesos y bloques rocosos en el fondo, producto de la remoción en masa o la caída de rocas, que presentan un alto potencial de ocurrencia de estos eventos (tracción y rodamiento de bloques y clastos de conglomerados). El perfil longitudinal del fondo del lecho es irregular, con cambios bruscos; forma saltos verticales (cascadas), rápidos y pozas espaciadas. Son ríos de patrón recto o poco sinuoso; la proporción entre el ancho y la amplitud vertical es alta, aunque en ocasiones puede ser similar.

Valles acumulativos. Localizados en la porción baja de las montañas y en los declives tendidos en transición hacia las llanuras, con un gradiente de pendiente menor a 2%. Su característica principal es la acumulación de sedimentos. Las principales causas del depósito de aluviones (sedimentos formados por corrientes fluviales en el cauce y la llanura por inundación de los valles) se presentan cuando el río pierde su capacidad de transporte, o cuando los tributarios llevan más material hacia la corriente principal. La pérdida del poder de transporte de un río se origina por la disminución de la velocidad debido al cambio de gradiente, obstáculos, diseminación del agua o pérdida de agua, o también por la disminución o cese del flujo a causa de la construcción de presas, diques o bordos (Figura 3.1o).

Barrancos. Se forman como producto de la erosión del escurrimiento proveniente de aguas pluviales, cuya escorrentía concentrada excava sobre materiales sin cohesión y de fácil remoción; por ejemplo, cenizas volcánicas, tobas deleznales, materiales volcanoclásticos y conglomerados. Están sujetos a crecidas esporádicas que modelan y socavan paredes y amplían su lecho por retroceso

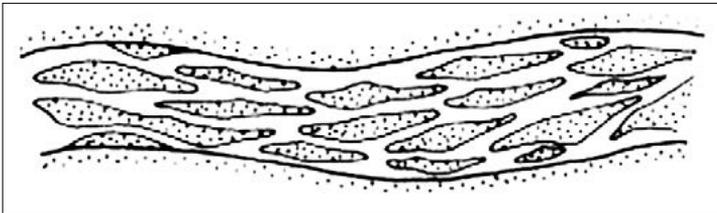


Figura 3.1o. Tramo de un valle acumulativo con patrón trenzado por acumulación aluvial. Canales entrelazados con depósitos aluviales intercalados. Fuente: Pedraza (1996).

de las laderas debido al colapso gravitacional al ser minadas las márgenes en la base.

Campos de cárcavas. Son producto del agua de las lluvias que se infiltran y posteriormente brotan sobre la superficie del terreno, quitándole la cohesión al suelo por el proceso de lavado subsuperficial, conocido como tunelamiento, por surcos y por la escorrentía difusa. Los flujos que convergen en la ladera se suman y forman un escurrimiento concentrado, lo que da lugar a zanjas de erosión sobre materiales aluviales, coluviones e intemperizados. Durante su evolución estas zanjas se unen para formar campos de cárcavas. Se caracterizan porque su perfil longitudinal es escalonado con una serie de rupturas de pendiente, desarrollando gradientes moderados (pendiente mayor de 5%), rango suficiente para que los eventos de avenida sean de tipo torrencial, con socavación de las orillas y capacidad para arrastrar material medio y grueso (Figura 3.1p).

Unidad de análisis: Geosistema

Los geosistemas representan los procesos naturales y humanos que ocurren en el espacio geográfico y se expresan en unidades cartográficas (mapas). Tienen la ventaja de ser interpretados rápidamente, su delimitación es poco costosa y el enfoque operativo o funcional se aplica con facilidad, ya que se adapta a las diversas escalas espaciales que requiera el análisis, además, no multiplican las capas temáticas creando numerosas unidades, sino que sintetizan territorialmente los diferentes componentes de los sistemas naturales, sociales y económicos. Asimismo,



Figura 3.1p. Campos de cárcavas. Red intrincada de zanjas naturales que forman un modelado de corte erosivo por la acción hídrica.

se consideran unidades sintéticas porque a partir de ellas se puede conocer qué hay (identificar), dónde está (localizar), cómo está (diagnosticar) y cuánto hay (evaluar). Además, la metodología para la identificación y delimitación de los geosistemas prácticamente se puede ajustar a diferentes tipos de sistemas o complejos territoriales de estudio, naturales (cuencas) o político-administrativos (estados y municipios).

Los geosistemas, a diferencia de otro tipo de unidades espaciales, son clasificados prioritariamente con base en criterios socioeconómicos y no del sistema natural (donde el relieve tiene un gran peso), aunque este último no se excluye. Otra diferencia radica en que los geosistemas reflejan el funcionamiento (uso) del territorio en un momento dado, particularmente en el actual; esto es importante, ya que así se constata que en la distribución histórica del uso del suelo no se ha considerado la vocación natural del territorio, por lo que en la mayoría de los geosistemas, sobre todo en los antrópicos, se concentran numerosos problemas ambientales (contaminación de suelos, agua y aire; erosión / sedimentación de suelos, y pérdida de hábitats naturales, entre otros).

La orientación principal de los otros tipos de unidades espaciales consiste en determinar la capacidad de acogida o el uso potencial del suelo; sin embargo, el enfoque de geosistemas también lo incluye. Esto contribuye a promover el uso preferencial de los geosistemas, al facilitar la toma de decisiones y la aplicación de políticas públicas relativas a la planificación territorial.

En un marco espacio-temporal dado, un geosistema es el resultado de la interrelación naturaleza-población-economía (González-Otero, 1994). Fue Sochava (1963), citado en González-Otero (1994) quien lo define como un “sistema de relaciones geográficas”, constituido por un conjunto de elementos y componentes que son interdependientes, y se caracterizan por tener una estructura y dinámica particular.

Algunos procesos globales que caracterizan el geosistema son:

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

En ecología se desarrolló el concepto ecosistema, y en geografía, geosistema; en los estudios ecogeográficos llevados a cabo por Tricart y Killian (1979) ambos términos se integran en geoeosistemas y posteriormente derivan nuevamente en geosistemas.

El esquema metodológico de los geosistemas se basa, como su nombre lo indica, en el enfoque sistémico, por lo tanto, es estructural, integral y funcional. Representa un instrumento lógico que puede aplicarse a numerosas disciplinas, entre ellas, la ecología y la geografía; es particularmente adecuado por tener fundamentos en una dialéctica permanente entre los componentes físicos, biológicos y humanos.

Otra tendencia del uso del término “geosistema” en las investigaciones geográficas del ambiente (marcada por el grupo de Medio Ambiente del Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba) reconoce que éste depende fundamentalmente de dos factores: la variabilidad de los distintos tipos de uso del territorio, y del área total en la que se desarrolla la función del territorio que sostiene dichos usos, atendiendo a las condiciones naturales. Dicha función refleja la necesidad de satisfacer los requerimientos de la sociedad en determinado espacio y tiempo (González-Otero, 1994).

De acuerdo con este criterio, la diferenciación de los geosistemas se lleva a cabo con la identificación de los límites de los diversos usos del suelo, donde se manifiestan los procesos de intercambio de sustancias y energía necesarios para la regulación y el funcionamiento de los propios geosistemas. González-Otero (1994) resalta que la mayoría de las actividades humanas condicionan o al menos propician el incremento de la heterogeneidad inherente a los complejos naturales y, al comparar esta última con la heterogeneidad antrópica adquirida, puede dimensionarse el grado de transformación del medio natural causado por las influencias del medio socioeconómico. Este enfoque es retomado en esta guía, y se adapta de acuerdo con las características de México y las escalas de aplicación.

El esquema jerárquico es usado para clasificar los geosistemas en orden descendente, de lo general a lo particular, y se agrupan en unidades relacionadas entre sí. Asimismo, los límites entre clases son específicos, basados en criterios objetivos, como se detalla en el apartado II de este libro.

La clasificación de los geosistemas parte de considerar al hombre con la capacidad o habilidad para transformar su espacio y, conforme a ello, se distinguen dos grandes grupos de geosistemas de primer orden: 1) los antrópicos, y 2) los naturales y semitransformados. En estos últimos el peso de las actividades socioeconómicas aún no rige las leyes y los procesos naturales, aunque exista un cierto grado de estrés ecológico (González-Otero, 1994).

Entre los geosistemas de primer orden se sitúa el grupo de los geosistemas mixtos, que no pertenecen propiamente a una categoría y se refieren a la combinación de un conjunto de geosistemas que, por la escala de trabajo, no se pueden

delimitar por separado por formar un mosaico muy heterogéneo. Sin embargo, se pueden diferenciar de acuerdo con la estimación de la superficie de los geosistemas dominantes en ese mosaico, por ejemplo, geosistema mixto-urbano o mixto rural.

En cuanto a los geosistemas de segundo orden, los antrópicos se dividen, de acuerdo con la influencia principal derivada de los diversos grupos de actividades económicas, en tecnógenos, agrarios y forestales. En lo que respecta a los geosistemas naturales y semitransformados, se organizan fundamentalmente según su ubicación en terrestres, transicionales (o de interfase, es decir, el área de interacción entre los procesos marinos y terrestres) y marinos; también se tiene en consideración su estructura y funcionamiento. Los geosistemas de segundo orden están subordinados a los anteriores, es decir, son subsistemas del primer orden.

En el tercer orden, los geosistemas se distinguen por la modalidad que caracteriza la influencia principal; por ejemplo, los tecnógenos se subdividen en industriales, urbanos, urbano-rurales, rural-urbanos y rurales, así como en hidráulicos (embalses o presas). Así, en los del tipo agrario se agrupa la agricultura de riego, de humedad y de temporal. Por los factores principales que inciden en su funcionamiento, los geosistemas terrestres se clasifican en bioclimáticos, hídricos e hidrodinámicos, y los tipos de vegetación dominantes. Los transicionales se agrupan, básicamente, por los factores morfodinámicos relacionados con las planicies costeras y las costas. Finalmente, se diferencian los geosistemas marinos en neríticos y abisales; en este caso, en función de la profundidad y de los límites de la plataforma continental.

Los geosistemas de cuarto orden corresponden al último lugar jerárquico, el de mayor detalle; son un subtipo de la influencia principal derivada del tercer orden. Por ejemplo, de los geosistemas industriales se separan los subtipos petroleros, mineros y portuarios; de los urbanos, los subtipos correspondientes a los sectores primario, secundario y terciario, según la actividad económica predominante.

En México este enfoque se ha utilizado desde 1992. El principal antecedente cartográfico aplicado al estudio del medio ambiente se encuentra en el Atlas Nacional de México (Oropeza, Palacio y D'Luna, 1992), específicamente en la carta denominada Síntesis del Medio Ambiente (escala 1:4 000 000), la cual se basa en la metodología de los trabajos del *Nuevo atlas nacional de Cuba* (IGACC, 1989). Otros ejemplos se encuentran en el *Atlas de procesos territoriales de Yucatán* (Oropeza *et al.*, 1999), en la carta Principales Geosistemas (escala 1:1 200 000), y en el *Atlas regional del Istmo de Tehuantepec* (Sánchez y Oropeza, 2003), en el mapa Geosistemas (escala 1:1 000 000). A partir de la información de este último

se evaluó, a escala regional, la problemática ambiental del istmo, donde se destacan los principales impactos de origen natural y antrópico. Recientemente se ha aplicado este enfoque de geosistemas para identificar sitios ambientalmente sensibles a los efectos por derrames de hidrocarburos (INE, 2007; Cram *et al.*, 2010).

Identificación y delimitación de geosistemas

La identificación, la diferenciación y la delimitación de los geosistemas se basan en los siguientes pasos:

1. Los geosistemas se diferencian por el tipo de cobertura antrópica y natural o semitransformada del territorio, es decir, por las coberturas observadas en gabinete o en campo; por ejemplo, de cultivos, pastizales o bosques y selvas, y por la función del mismo, que corresponde a los usos del suelo (agrícola, ganadero, forestal, etcétera).
2. Se reconocen los factores que determinan la existencia de los principales tipos de vegetación natural, como los climáticos, los geomorfológicos (condiciones litológicas y edáficas) y los hídricos o hidrodinámicos.
3. Se define la estructura y el contenido preliminar de la leyenda. Este paso se realiza mediante la observación rápida y directa de las imágenes satelitales, fotografías aéreas y otros materiales de percepción remota, así como del primer reconocimiento general en campo del área de estudio.
4. Se sigue un orden jerárquico que parte de lo general (geosistemas de primer orden) a lo particular (geosistemas de cuarto orden). Igualmente, se ordenan atendiendo a los insumos de materia y energía artificial que necesitan para su funcionamiento. En la Tabla 3.1a se muestra la clasificación completa a escala nacional (1:4 000 000) de los tipos de geosistemas que pueden identificarse, y en la Tabla 3.1b se muestra un ejemplo a escala regional (1:50 000) con ligeras modificaciones de la clasificación anterior.
5. Se distinguen unidades relativamente homogéneas y a la vez repetitivas (clasificación tipológica), que no necesariamente deben estar contiguas.
6. Según la escala, su representación cartográfica puede ser areal, lineal o puntual. En el caso de geosistemas puntuales y lineales, las variables visuales cartográficas como el color, la forma y el tamaño ofrecen información que determina sus características.

Tabla 3.1a. Tipos de geosistemas a escala nacional.

Orden	1°	2°	3°	4°	
Geosistemas principales	Geosistemas antrópicos (transformados)	Tecnógenos	Industrial	Petrolero	
				Minero	
				Urbano	
				Portuario	
				Turístico	
		Agrarios	Hidráulico	Embalses	
				Forrajes de grano	Cultivos de temporal
			Monocultivos y cultivos diversificados de roturado periódico	Cultivos industriales	Cultivos con riego
				Cultivos de temporal	
				Cereales, leguminosas y hortalizas	Cultivos con riego
				Cultivos de temporal	
				Cereales y leguminosas	Cultivos con riego
				Cultivos de temporal	
				Frutales	Cultivos con riego
				Cultivos de temporal	
Monocultivos de roturado no periódico	Cultivos industriales	Cultivos con riego			
Cultivos de temporal					
Pastizal cultivado y natural					
Geosistemas mixtos	Combinaciones de geosistemas antrópicos y/o naturales y seminaturales				

Tabla 3.1a. Continúa.

Orden	1°	2°	3°	4°
Geosistemas principales	Geosistemas naturales, seminaturales y semitransformados	Terrestres	Factores bioclimáticos	Bosques de coníferas y latifoliadas
				Bosque mesófilo de montaña
				Bosque tropical perennifolio
				Bosque tropical subcaducifolio y caducifolio
				Bosque espinoso
				Matorral xerófilo
				Vegetación secundaria
				Desiertos muy cálido-áridos con campos de dunas
				Periglaciales o glaciales
				Factores hídricos
		Transicionales (interfase)	Litoral (factores morfodinámicos)	Costa potamogénica de marismas y/o pantanos con vegetación dominante de manglar
				Costa potamogénica de marismas y/o pantanos con vegetación acuática y subacuática sin manglar dominante
				Playas bajas arenosas (acumulativas)
				Costa rocosa (erosiva)
				Costa mixta (alternancia de costas)
				Costa biogénica (barrera arrecifal)
		Insulares	Factores bioclimáticos	Islas cálido-áridas y semiáridas con matorral xerófilo
				Islas cálido-húmedas con bosque tropical subcaducifolio y caducifolio
		Marinos	Nerítico	Plataforma continental con sedimentos terrígenos
				Plataforma continental con sustrato calcáreo
Plataforma continental con bancos coralinos				
		Abisal	Mar profundo	

Fuente: elaboración propia con datos de Oropeza, Palacio y D'Luna (1992).

Tabla 3.1b. Ejemplo de leyenda para el mapa de geosistemas de la cuenca baja de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá.

Orden	1°	2°	3°	4°
Geosistemas principales	Geosistemas antrópicos (transformados)	Tecnógenos	Industriales	1. Petroleros
				2. Mineros
				3. Portuarios
			Urbano, urbano-rurales, rural-urbanos y rurales	4. Agrarios / Pecuarios
				5. Sector primario
				6. Sector secundario
		Agrarios	Hidráulicos	7. Sector terciario
				8. Embalses
			Agricultura de humedad	9. Cultivos anuales
				10. Cultivos anuales
				11. Cultivos permanentes y semipermanentes
				12. Cultivos permanentes
	Agricultura de temporal	13. Pastizales cultivados e inducidos		
		14. Combinaciones de todo tipo de geosistemas		
		Geosistemas mixtos		
	Geosistemas naturales y semitransformados	Terrestres	Factores bioclimáticos	15. Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria
				16. Lagunas y ríos
			Factores hidrodinámicos	17a. Planicie acumulativa fluvio-lacustre y palustre
				17b. Planicie acumulativa de bajos inundados permanentemente
Transicionales (interfase)		Factores morfodinámicos (costas y planicies costeras)	18. Planicies acumulativas costeras	
			19. Costa acumulativa (playas arenosas)	

Tabla 3.1b. Continúa.

Orden	1°	2°	3°	4°
Geosistemas principales	Geosistemas naturales y semitransformados	Transicionales (interfase)	Factores morfodinámicos (costas y planicies costeras)	20. Lagunas costeras y esteros
				21. Manglares
		Marinos	Nerítico	Plataforma continental con sedimentos terrígenos

Fuente: elaboración propia con datos de Cram *et al.* (2010).

Capítulo 4. Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad

*Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco,
Pilar Fernández Lomelín, Jean-François Parrot Faure*
Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, UNAM

Ania Mendoza Cantú
Instituto Nacional de Ecología
y Cambio Climático

*José María Casado Izquierdo
Ma. Teresa Sánchez Salazar*
Departamento de Geografía Económica
Instituto de Geografía, UNAM

Para evaluar la vulnerabilidad de una zona existen varios enfoques; por un lado, debe considerarse el conjunto de impactos y efectos que se han presentado con anterioridad en el área de estudio (análisis histórico de los derrames ocurridos), que se traducen en un debilitamiento de la capacidad de los geosistemas para soportar amenazas adicionales. En este caso no interesa saber cuáles, ni cuántos ni qué tan intensos fueron, sino las consecuencias que llevaron a la transformación de los geosistemas, ya que sería un error considerar el punto de arranque como si no hayan ocurrido impactos en el pasado. Este criterio se considera en el componente abiótico del medio biofísico descrito más adelante.

Por otro lado, cuando el objetivo es conservar y proteger los recursos naturales, así como el grado de integridad del sistema actual, los impactos y efectos que se hayan presentado en el pasado pueden no ser considerados, sino solamente la situación presente. En este sentido, la vulnerabilidad se interpreta de la siguiente manera: a mayor integridad del sistema (lo que se desea proteger), mayor vulnerabilidad, dado que el interés estriba en la conservación de los recursos. En otras palabras, mientras el geosistema se encuentre menos alterado por las actividades antrópicas, es más vulnerable, y es precisamente esta integridad la que se quiere

mantener. Este criterio se refleja en las variables del componente biótico del medio biofísico.

Se describen a continuación las variables que permiten evaluar el grado de vulnerabilidad intrínseca en el ejemplo de estudio. Es importante mencionar que éstas se eligen en función del tipo de amenaza y se discuten en talleres académicos participativos. Posteriormente se describen brevemente las variables que permiten estimar la vulnerabilidad extrínseca.

Cabe recordar que los elementos que pueden ser de interés de protección ante alguna amenaza, citados en el marco conceptual, como los asentamientos humanos con población mayor a 15 000 habitantes, las áreas naturales protegidas, las zonas arqueológicas y los cuerpos de agua, no serán tomados en cuenta para el análisis de la vulnerabilidad del sitio, ya que se clasifican *a priori* como de muy alta vulnerabilidad intrínseca (INE, 2009; Cram *et al.*, 2010).

Vulnerabilidad intrínseca

Medio biofísico

Para el análisis de la vulnerabilidad del medio biofísico se reconocen tres componentes: abiótico, biótico y antrópico (Figura 4.1). Se procura que éstos sean lo más independientes entre sí para evitar redundancias al considerar dos o más veces una variable que produzca el mismo resultado; sin embargo, a veces es difícil individualizar las características que los definen, ya que representan procesos continuos y concatenados en el tiempo y el espacio.

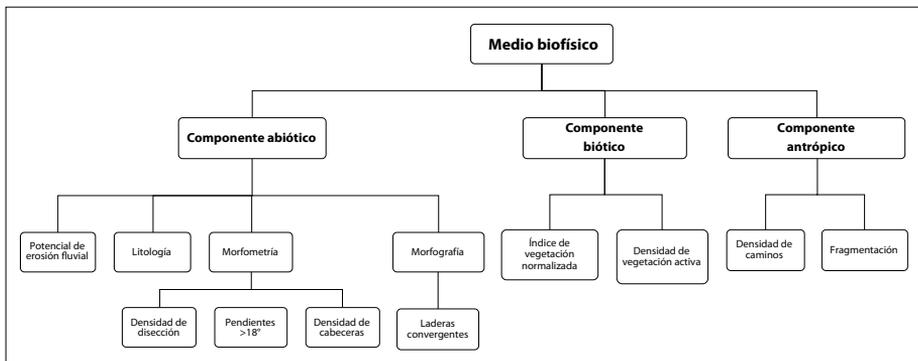


Figura 4.1. Elementos de los componentes abiótico, biótico y antrópico del medio biofísico. Fuente: Elaboración propia.

Componente abiótico

Esta sección incluye las características propias de los sistemas, producto de su génesis y evolución, o que son el resultado de la interacción de los materiales que los forman y las estructuras o arreglos que adoptan. Son características adquiridas al margen de los organismos vivos, incluyendo al ser humano; son difíciles de modificar y, por tanto, relativamente perdurables a largo plazo.

En la Figura 4.1 se presenta de forma breve y esquemática la estrategia elaborada para la caracterización del componente, donde la estructura espacial se aborda a nivel de unidades de terreno y a nivel de geosistemas.

Estructura espacial

La evaluación de la vulnerabilidad se examina en función de las unidades de terreno y de los geosistemas que representan las unidades espaciales de análisis con base en los siguientes aspectos:

- a) El *potencial de erosión fluvial*, en el que se considera la posibilidad de modificación del paisaje geomorfológico por este proceso; incluye, además, la denudación, el transporte y la acumulación de materiales.
- b) La *litología*, en la que se analiza el grado de cohesión de los materiales, lo que determina su resistencia o debilidad ante procesos geomorfológicos.
- c) La *morfometría*, es decir, las mediciones directas de longitudes, áreas, alturas o pendientes, con el fin de establecer comparaciones, relaciones o proporciones relativas entre los diferentes tipos de geosistemas presentes en el área de estudio.
- d) La *morfografía*, que se refiere a la influencia que tienen las formas del relieve terrestre en la manifestación y facilidad con que se desarrollan los procesos, como la geometría de las laderas. En este estudio el análisis se centra en las laderas, ya que es relativamente fácil identificar las estructuras que las constituyen y los procesos que las caracterizan. Por ejemplo, en ellas se forman los sistemas de drenaje y ocurren los procesos de erosión-denudación, con su contraparte de acumulación, que contribuyen significativamente a la formación de suelos en las partes bajas a partir de la remoción de materiales de las partes altas.

A continuación se describen las variables a evaluar para medir la vulnerabilidad intrínseca ante amenazas, como el derrame de hidrocarburos.

a) Potencial de erosión de las unidades de terreno

Es el conjunto de procesos que pueden modificar las formas del relieve, por medio de los cuales se produce la separación de los productos del intemperismo del sustrato original o de depósitos volcánicos o exógenos sin consolidación (Lugo, 2011).

Para evaluar esta variable se ha seleccionado como método el levantamiento geomorfológico, que permite identificar las principales estructuras del relieve y sus características. Estas últimas revelan los indicadores intrínsecos de la vulnerabilidad regional en relación con el funcionamiento de las unidades de terreno. Así, se considerarán con un alto potencial de erosión los terrenos que manifiesten una pérdida de cohesión debido a su posición potencial de desequilibrio (dados por la altitud y una fuerte pendiente), que estén conformados por material disgregable y sean susceptibles a eventos como la inestabilidad por procesos gravitacionales o de remoción en masa, o a una transformación acelerada de otro tipo. Con base en el grado de expresión de estas características, se puede establecer una serie de categorías jerárquicas que servirán como claves analíticas para establecer, posteriormente, la vulnerabilidad de las unidades de terreno.

En la Tabla 4.1. se enlistan las clases en las que se subdivide el paisaje geomorfológico y que se detallan en el Capítulo 3. Identificación y delimitación de unidades territoriales, de esta guía. En cada una se incluye una categoría del potencial de erosión fluvial del terreno (de muy alto a muy bajo); sin embargo, estas calificaciones tienen un grado de subjetividad muy elevado, ya que son establecidas en función del estatus de cada área en particular y, por lo tanto, deben sujetarse a la verificación de un experto.

El criterio propuesto para asignar una categoría de vulnerabilidad a las unidades de terreno por su potencial de erosión fluvial es: a mayor porcentaje de

Tabla 4.1. Tipos de unidades de terreno y su potencial de erosión fluvial.

	Unidades de terreno (paisajes geomorfológicos)	Potencial de erosión fluvial
Elevaciones mayores	a) Nivel de cumbres	Muy alto
	b) Superficie de divisorias (parteaguas)	Moderado
Laderas de montaña	a) Talud superior	Muy alto
	b) Talud intermedio	Muy alto
	c) Talud inferior	Muy alto

Tabla 4.1. Continúa.

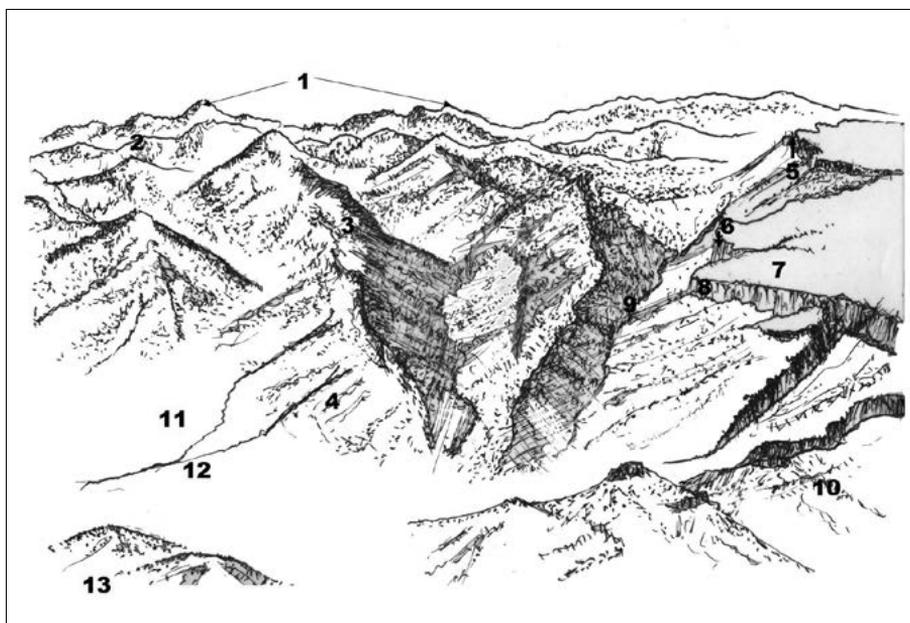
Unidades de terreno (paisajes geomorfológicos)		Potencial de erosión fluvial	
Planicie inclinada de transición	a) Sector proximal	Alto	
	b) Sector central	Moderado	
	c) Sector distal	Moderado	
Planicie con elevaciones menores	a) Planicie con colinas dispersas	Bajo	
	b) Planicie con lomeríos	Bajo	
	c) Planicie ondulada e irregular	Bajo	
Morfología mesiforme (altiplano-mesa, pilares)	a) Sector interno	a.1) Con incisión abierta de baja densidad de disección	Bajo
		a.2) Con incisión moderada, de densidad de disección media	Bajo
		a.3) Con incisión estrecha y cerrada, con densidad de disección alta	Moderado
	b) Sector de borde periférico de transición	b.1) Con incisión abierta	Moderado
		b.2) Con incisión moderada	Moderado
		b.3) Con incisión estrecha-cerrada	Moderado
	c) Talud de escarpa superior	c.1) Con incisión abierta	Alto
		c.2) Con incisión moderada	Alto
		c.3) Con incisión estrecha-cerrada	Alto
	d) Talud inferior acumulativo	d.1) Con incisión abierta	Muy alto
		d.2) Con incisión moderada	Muy alto
		d.3) Con incisión estrecha-cerrada	Muy alto
Planicie de tierras bajas*	a) Planicie aluvial de inundación	a.1) Con patrón anastomosado o trezado	Alto
		a.2) Con patrón meándrico	Moderado
	b) Planicie fluvial confinada	Moderado	
	c) Planicie fluvial de desborde	Moderado	
	d) Planicie de delta	Alto	
	e) Planicie costera de acumulación	Moderado	
	f) Planicie lagunar-costera	Alto	
	g) Planicie costera eólica o de campos de dunas costeras	Alto	
h) Planicie de cordones de playa	Bajo		

Tabla 4.1. Continúa.

	Unidades de terreno (paisajes geomorfológicos)	Potencial de erosión fluvial
Sistema fluvial	a) Valles de montaña erosivos	Moderado
	b) Valles acumulativos	Moderado
	c) Barrancos	Muy alto
	d) Campos de cárcavas	Muy alto

*Terrenos bajos y planos formados por la acumulación de material sedimentario que puede ser aluvial, fluvial, marino, lacustre, eólico, etcétera.

Fuente: elaboración propia con datos de Ortiz-Pérez (1998).



1) Elevaciones mayores 2) Nivel de cumbres 3) Partaguas 4) Rampa de piedemonte 5) Talud de escarpa superior 6) Barranco 7) Altiplano-mesa 8) Cañón 9) Valle de montaña erosivo 10) Laderas de montaña 11) Planicie de tierras bajas 12) Valles acumulativos 13) Planicie con elevaciones menores.

Figura 4.2. Unidades de terreno. Fuente: Elaboración propia.

superficie ocupada por la unidad de terreno con mayor potencial de erosión, por tipo de geosistema, habrá mayor vulnerabilidad intrínseca.

A mayor potencial de erosión fluvial, es más probable una mayor pérdida de suelos y, en caso de derrame de hidrocarburos, mayor será la dispersión del fluido, ya que éste se dispersará en función de la mayor altura y de un elevado gradiente de los declives. La distribución del derrame será preferentemente de carácter lineal y alcanzará distancias más grandes.

b) Litología

La litología se centra en el estudio de las rocas, sus características físicas y químicas (*p. ej.*, composición química y mineralógica, textura, resistencia, color, etcétera), e incluye el tipo de transporte, distribución espacial y material cementante.

Los minerales que constituyen la roca determinan, en parte, si ésta es susceptible a la meteorización, ya sea química o física. Es común hablar de las rocas como si fueran “duras o resistentes” y “blandas o débiles” ante los procesos geomorfológicos; sin embargo, es necesario recordar que una roca puede ser resistente ante un proceso, pero débil ante otro. El grado de fragilidad de una unidad espacial puede ser aproximado al asignarle valores asociados al tipo de roca, que se designa de acuerdo a su grado de cohesión (compactación), como se verá más adelante.

Para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca por erosión fluvial por tipo de geosistema, la variable se basa en la permeabilidad de las rocas con respecto a los procesos de infiltración o de flujo interno; de tal manera que el basalto, el granito, el gneis, la arenisca y la cuarcita son materiales duros e impermeables, por lo que se espera que la densidad de drenaje sea baja, especialmente si la roca es a la vez masiva, compacta, firme y sin signos de meteorización; estas características le confieren una alta resistencia. Por otro lado, los materiales blandos, como margas o arcillas, son menos resistentes a este tipo de erosión, por lo cual se considera que presentan una baja resistencia y favorecen los escurrimientos. Puede decirse que, en general, entre más blanda, suelta o de grano más fino o individualizado sea la roca dominante, tendrá menor resistencia a la erosión.

La Tabla 4.2 presenta el grado de resistencia de distintos tipos de rocas. Debe tenerse en cuenta que se trata de una generalización, por lo que es necesario analizar las características propias de las rocas presentes en el área de interés; por ejemplo, puede encontrarse una roca muy resistente, pero estar agrietada, lo que favorecería la infiltración de los hidrocarburos en caso de derrame.

El criterio establecido es que, mientras mayor sea la superficie ocupada por la clase de roca dominante con menor resistencia a la erosión fluvial por tipo de geosistema, mayor será la vulnerabilidad intrínseca; es decir, a menor resistencia de la roca, mayor pérdida por el proceso de intemperismo y erosión. Se generan

Tabla 4.2. Tipos de rocas en función de su resistencia a la erosión fluvial.

Tipo de roca y descripción	Resistencia a la erosión fluvial
Duras, masivas, firmes y cohesivas: ígneas y metamórficas, basalto, granito, gneis, arenisca y cuarcita	Muy alta
Rocas clásticas cementadas y consolidadas, de fragmentos angulares y redondeados: ígneas, metamórficas o sedimentarias, como conglomerados, areniscas cuarcíticas, brecha, arcosa, etcétera	Alta
Rocas duras de precipitados químicos de la familia de los carbonatos: rocas sedimentarias como caliza, coquina, dolomita, caliza fosilífera*	Media
Rocas compactas semiconsolidadas: ígneas, metamórficas y sedimentarias, como tobas volcánicas, materiales parentales de eluvión, de grano fino, foliadas o no, pero sí deleznable, como limolita, filita o marga	Baja
Sedimentos sueltos transportados o depositados por el viento, como loess (con predominio de limos), cenizas volcánicas con arenas finas, aluviones lacustres y palustres de sedimentos sueltos, de playa, de campos de dunas, etcétera	Muy baja

*Se descartan el travertino, el yeso, la tiza con organismos microscópicos y de arcilla blanda, la roca de sal, las evaporitas, etcétera, debido a que pasan al siguiente orden de alta fragilidad. Fuente: elaboración propia con datos de Espinosa-Rodríguez (2009).

más cauces que favorecen un mayor escurrimiento de los hidrocarburos y, por lo tanto, sus afectaciones pueden llegar más lejos.

c) Morfometría

La morfometría estudia las características cuantitativas de las formas del relieve, como la altura, la superficie y la pendiente. Dentro de los principales índices morfométricos se encuentran la densidad de disección, la profundidad de disección, la amplitud del relieve y la densidad de cabeceras. Las siguientes variables son las que mayor rango de aplicación tienen en el territorio nacional y que dan información básica acerca de las características morfométricas de una zona (Zinck, 2012).

c.1 Densidad de disección del relieve. Se refiere a la relación de la longitud de cauces fluviales de todos los órdenes (km) por unidad de superficie (km²) (Lugo, 1988). La densidad de disección puede asociarse fácilmente con los procesos erosivos en un área; valores altos indican fuertes e intensos procesos erosivos, ya sea

porque las precipitaciones sean fuertes o agresivas, porque el material del sustrato o suelo sea muy susceptible a erosión, o por ambos. Los procesos evaluados se desarrollan sobre todo en el plano horizontal. Se considera que las manifestaciones de la erosión son representativas de efectos causados por agentes naturales, por ejemplo, las lluvias (Pedraza, 1996).

Mientras mayor sea el índice de densidad de disección por tipo de geosistema, mayor será la vulnerabilidad intrínseca, ya que se manifiestan más los cortes erosivos del paisaje. En caso de derrame de petróleo a partir de ductos, a mayor densidad de disección, mayor el área de afectación por la concentración de vías naturales por donde se dispersaría el derrame.

c.2 Dominancia de las pendientes mayores a 18°. En geomorfología una pendiente se refiere a la inclinación de una superficie medida entre dos puntos (Lugo, 2011); este valor puede estar en grados o en porcentaje. Aunque no hay un reconocimiento estandarizado, se acepta comúnmente que 18° de pendiente constituyen el límite máximo para el uso productivo de los terrenos, de otro modo, se corre el riesgo de desencadenar su severa erosión (MOPUT, 1991; CEOTMA, 1991; Bazant Sánchez, 1983). Geomorfológicamente, estas pendientes se encuentran en declives de montaña y debe considerarse que la intensidad y magnitud de los procesos de inestabilidad asociados dependen del lugar donde se desarrollen; por ejemplo, si ocurren en las porciones altas de la pendiente, habrá un efecto acumulativo hacia las partes bajas, lo que acelerará los procesos erosivos e incrementará la velocidad de los escurrimientos.

Mientras más grande sea la superficie ocupada con pendientes mayores a 18° por tipo de geosistema, mayor será la vulnerabilidad intrínseca, ya que, a mayor pendiente, se espera una mayor pérdida de suelos (erosión-denudación), lo que puede propiciar la inestabilidad de la red de ductos. De igual manera, en caso de derrame de petróleo, a mayor pendiente, mayor velocidad y desplazamiento del flujo.

c.3 Densidad de cabeceras. Una cabecera es la parte superior (o inicio) de un cauce fluvial, de una cuenca hidrográfica o de un valle donde predomina la erosión vertical, con un modelado incipiente del cauce, a menudo con escollos rocosos y débil desarrollo de terrazas o de algunos procesos gravitacionales (Lugo, 2011). Las cabeceras se forman donde se origina un proceso gravitacional de desprendimiento y señalan terrenos muy susceptibles a deslizamientos y a erosión hídrica (Zinck, 2012). Es una cicatriz en el terreno, limitada por un talud que expresa la erosión regresiva aguas arriba de un río (parte superior de un cauce fluvial), y

constituye un reflejo del daño (erosión, movimientos de masa) que se desarrolla sobre el terreno y tiende a extenderse con el tiempo.

Mientras mayor sea la superficie ocupada por cabeceras por tipo de geosistema, mayor será la vulnerabilidad intrínseca, ya que esto es indicativo de sitios muy susceptibles a procesos gravitacionales y a erosión hídrica. El comportamiento esperado de los derrames en este sentido sería: a mayor densidad de cabeceras, mayor afectación. Esto tiene que ver también con la frecuencia de las cabeceras y la superficie que ocupan. Igualmente, la ampliación de las cabeceras puede afectar los ductos cercanos.

d) Morfografía

La morfografía se ocupa de describir y clasificar las formas del relieve y su sistematización según sus caracteres externos (Lugo, 2011). La variable que se evalúa en este estudio está referida a la curvatura de la superficie de las laderas, lo que le confiere una forma y configuración características.

d.1 Forma y configuración de la ladera: laderas convergentes. La forma y configuración de la ladera está dada por la curvatura vertical y horizontal de la superficie de las laderas. Las formas convergentes convexas concentran la energía y la materia (escurrimientos, escombros, sedimentos) en mayor grado (Figura 4.3).

En la Tabla 4.3 se hace una breve descripción de los procesos que prevalecen en las unidades de terreno, de acuerdo con la curvatura del relieve, con el objeto de explicar los efectos que tiene la forma y configuración de la ladera en cuanto

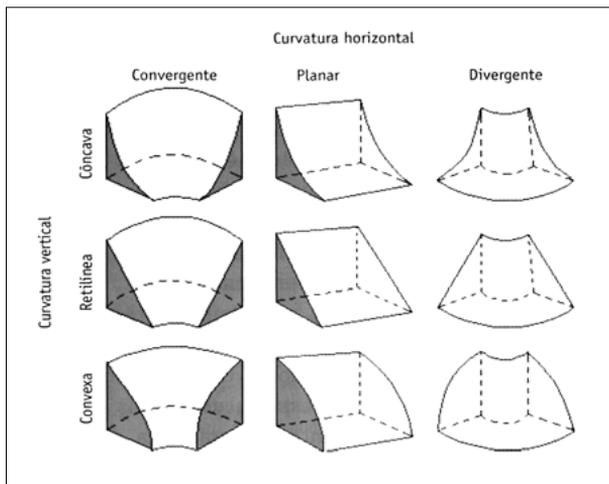


Figura 4.3. Modelos de perfiles y contornos de las superficies de las laderas. Fuente: Florenzano (2008).

al flujo de la materia y la energía. El tamaño de las flechas representa la magnitud o intensidad de los procesos, las flechas paralelas a la pendiente representan los escurrimientos superficiales y las flechas perpendiculares, la infiltración.

El efecto en cuanto al flujo de materia y energía será mayor o menor, y depende de si se trata de una ladera con una pendiente cercana a los cero grados (superficies horizontales-planas) o si está próxima a los 45-90° (muy pronunciada)

Tabla 4.3. Flujo de materia y energía en las unidades espaciales en función de la forma y configuración de la ladera.

Forma y configuración de la ladera	Diagrama de ejemplo	Efectos en cuanto al flujo de materia y energía
<p>Superficies horizontales y planas donde la fuerza de gravedad (energía cinética) es mínima; la falta de pendiente propicia el flujo vertical interno y la formación de suelo. Prácticamente no se presenta flujo horizontal.</p>		Muy bajo
<p>Perfiles convexos, rectos y cóncavos de superficies radiales divergentes, caracterizadas por difundir la energía y la materia. En la modalidad de la combinación convexa-divergente existe un área mayor de la ladera con superficie pronunciada; difunde el flujo a una mayor velocidad impartida por el perfil de mayor pendiente, lo cual facilita la acción de la destrucción de tierras por erosión de suelos en las porciones bajas. En la combinación de perfil cóncavo-divergente, las áreas de pendientes fuertes se ubican en la porción alta, pero ocupan la tercera parte de la ladera, y más abajo se reduce la pendiente de manera sensible, dispersando el flujo radialmente en forma de abanico y cediendo a una escorrentía difusa, así, el flujo se dispersa radialmente perdiendo energía por difusión.</p>		Bajo

Tabla 4.3. Continúa.

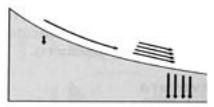
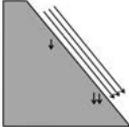
Forma y configuración de la ladera	Diagrama de ejemplo	Efectos en cuanto al flujo de materia y energía
<p>Perfil cóncavo en uno, recto en otro y convexo con contornos planos en los tres casos. En el primero la superficie pronunciada es mínima con respecto a la porción baja de menor pendiente, con lo que permite una mayor percolación-infiltración. En el recto de superficie plana habrá mayor flujo superficial y menor infiltración; sin embargo, el flujo será unidireccional y paralelo, sin lograr una dispersión o concentración. La combinación de mayor vulnerabilidad es convexo-planar, por su mayor cobertura de superficie con pendientes pronunciadas, lo que propicia una mayor velocidad e intensidad de la escorrentía, con la potencial formación de surcos y cárcavas por erosión.</p>	 <p data-bbox="623 553 863 660">Pendientes planas como cuestas y rampas flujo unidireccional paralelo (lineal o recta).</p> 	Medio
<p>Concentración del flujo en la medida en que corre cuesta abajo porque la curvatura del perfil determina una mayor pendiente (junto con los contornos convergentes de la geometría de la superficie) y, por ende, una concentración del escurrimiento. Este último se liga a una velocidad mayor de los procesos de escorrentía con escaso poder de infiltración; prácticamente abarca las tres cuartas partes de la superficie de la ladera con esta geometría. Tal morfología provoca que el escurrimiento se reúna ladera abajo favoreciendo crecidas instantáneas.</p>	 <p data-bbox="623 1148 863 1255">Pendientes convergentes, colectoras de agua, concentradoras de energía y materia.</p> 	Alto

Tabla 4.3. Continúa.

Forma y configuración de la ladera	Diagrama de ejemplo	Efectos en cuanto al flujo de materia y energía
<p>Laderas escarpadas de frente libre dispuestas entre 45° y 90° de pendiente; representan los taludes de mayor energía potencial y cinética. Presentan problemas de desprendimiento de bloques, saltos de agua, etcétera.</p>	 <p>Pendientes muy pronunciadas o verticales.</p>	Muy alto
		

Fuente: Elaboración propia.

o vertical), si es convexa convergente o divergente, o si es cóncava convergente o divergente (Pedraza, 1996).

Para evaluar la dinámica propia del sitio e identificar la forma y configuración de la ladera en el área de estudio es necesario entender cuáles son los procesos que se llevan a cabo y su dinámica. Entre más escarpada y de contorno convergente sea la ladera, mayor será la concentración de materia y energía en la unidad de terreno que la alberga, al contrario de las laderas divergentes, que se paran, difunden y esparcen dicha energía. Este criterio se aplica para los derrames de petróleo, ya que las laderas convergentes concentrarán sus flujos.

A mayor porcentaje de superficie ocupada por laderas de contornos convergentes y perfiles pronunciados mayores de 18° por tipo de geosistema, mayor será el flujo de materia y energía y, por tanto, mayor vulnerabilidad; lo mismo sucederá con respecto a los derrames, ya que concentrará el flujo y éste alcanzará mayor distancia.

Componente biótico

El objetivo de considerar el componente biótico es la conservación de la biodiversidad, particularmente la vegetación natural. En este sentido, no se tendrá en cuenta el conjunto de impactos y efectos presentado con anterioridad para definir la capacidad de soportar amenazas adicionales, sino que el grado de integridad del sistema es el que determinará la vulnerabilidad; mientras más conservada se encuentre la vegetación natural, mayor será su vulnerabilidad. Con este enfoque se cuantifican las variables de índice de vegetación diferencial normalizado y densidad de vegetación.

Los beneficios que la vegetación natural prodiga al suelo son ampliamente reconocidos, como el aumento de la rugosidad y la fricción de la superficie del terreno, haciéndolo más resistente a los agentes y procesos de erosión, ya que al actuar como barrera, propicia una disminución de la velocidad de los flujos de materia-energía, así como su dispersión, y, por ende, reduce su potencial de erosión. La cobertura vegetal protege el suelo de la energía cinética ocasionada por la lluvia, lo que le permite conservar su estructura y mantener su permeabilidad, además, favorece el desarrollo de la edafofauna que mezcla, distribuye y homogeniza los materiales del suelo, aumentando su porosidad.

El porcentaje de área cubierta por vegetación natural es un indicador muy útil para establecer la vulnerabilidad. Se debe tener en cuenta que algunos tipos de vegetación son, por sus características, bastante dispersos; sin embargo, no dejan de ejercer sus beneficios sobre el suelo, comparándolos con los suelos desnudos o sus usos antrópicos.

Si bien existen varias alternativas para evaluar la integridad de la cobertura vegetal, en este documento se propone estimarla mediante dos variables: el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) y la densidad / concentración de la vegetación activa. Estos criterios de diferenciación basados en la fisonomía vegetal también pueden apoyarse en el clima que afecta a la zona, en la pendiente y en los factores edáficos, pues los tres son factores que la condicionan.

a) Índice de vegetación diferencial normalizado.

El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) es una variable que permite estimar la cobertura de la vegetación con base en la medición, con sensores remotos, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético, emitida o reflejada por la misma. Este índice corresponde a una transformación no lineal de las bandas que corresponden al rojo visible (R) e infrarrojo cercano (NIR); se obtiene de la diferencia entre los valores

de estas bandas (R, 0.63-0.69 μm ; NIR, 0.76-0.90 μm), y corresponde a una medida del vigor de la vegetación en cuanto al contenido de humedad.

El NDVI es el resultado de combinaciones de bandas espectrales que permiten resaltar la vegetación de una superficie y, al mismo tiempo, atenuar rasgos como el suelo, las zonas urbanas, los cuerpos de agua, etcétera. Sus valores están comprendidos entre -1 y $+1$, donde los valores negativos indican superficies sin vegetación (tales como cuerpos de agua, nieve o nubes), y los valores positivos, presencia de vegetación.

Cabe mencionar que el cálculo del NDVI depende, en cierta medida, de la temporada del año en que se tomó la imagen satelital, ya que puede mostrar una alta reflectancia en temporada de lluvias (humedad), y una menor en temporada de estiaje; sin embargo, se puede hacer una comparación entre ambas imágenes.

Mientras más conservada se encuentre la vegetación natural por tipo de geosistema, mayor será su vulnerabilidad, dado que hay una mayor efectividad de operación de los procesos naturales, y mayor producción de bienes y servicios ambientales, que se desean proteger. Por lo tanto, entre mayor sea la superficie con un NDVI alto (0.13 a 1) por tipo de geosistema, mayor será la vulnerabilidad intrínseca, dado que hay un mayor grado de integridad del sistema. En agrosistemas ocurre lo mismo: si hay presencia de plantas cultivadas, el NDVI será alto y, por lo tanto, la vulnerabilidad será mayor.

Entre mayor superficie ocupada por vegetación con un NDVI alto, mayor vulnerabilidad de los geosistemas en caso de derrame de petróleo a partir de ductos.

b) Densidad / concentración de la vegetación activa.

La cobertura vegetal es la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre y elemento indicador del estado o la condición que guardan los ecosistemas; también comprende la cobertura vegetal inducida, como las áreas cultivadas por el hombre. La densidad de vegetación está dada por el número de individuos por unidad de superficie, que se pueden cuantificar por medio de la cobertura.

La cobertura vegetal permite la existencia de diversas especies en un ecosistema. Cuando se pierde o fragmenta, generalmente por actividades antrópicas (por ejemplo, la industria minera o petrolera, la agricultura y la ganadería), se presentan cambios negativos, como es el caso de los escasos relictos de selva perennifolia que quedan en el municipio de Poza Rica, debido al cambio de uso de suelo de selva a pastizal inducido para el pastoreo.

Bajo este supuesto, la variable de concentración de la vegetación permitirá identificar las zonas con mayor variedad de especies faunísticas y florísticas que

requieran atención en el plano preventivo, y acciones de autoprotección orientadas a reducir los costos de afectación al ambiente que pudieran ocurrir a consecuencia de derrames de petróleo a partir de ductos.

Como se mencionó anteriormente, a mayor densidad de vegetación activa por tipo de geosistema, mayor efectividad de operación de los procesos naturales y mayor producción de bienes y servicios ambientales, los cuales se desean preservar, por lo tanto, existe una mayor vulnerabilidad intrínseca. Es importante verificar en campo los datos obtenidos por teledetección para las diferentes clases de vegetación, con el fin de relacionarlos o validarlos.

Componente antrópico

Los caminos (ya sean veredas o carreteras), así como los canales, derechos de vía o ductos seccionan los paisajes y modifican la red de flujo hídrico. Estos efectos favorecen al aumentar los flujos (en caudal o en velocidad), o perjudican al dispersar los caudales, o al forzar a una reorganización de toda la red. Por estos efectos, se considera que la caracterización de los elementos antrópicos constituye un indicador del grado de perturbación o degradación de los terrenos que ocupa el geosistema. Este componente se evalúa por medio de las variables densidad de caminos y fragmentación.

a) Densidad de caminos.

Se refiere a la longitud de caminos por unidad de superficie. Para calcular la densidad se consideran los caminos paralelos y los transversales a la pendiente principal del terreno. Los primeros son aquellos orientados a favor de la pendiente dominante de la ladera, que canalizan los flujos y aumentan tanto el gasto o caudal (cantidad de flujo que pasa en una unidad de tiempo) como su velocidad, con lo que potencian enormemente su capacidad erosiva (Forman y Alexander, 1998; Forman *et al.*, 2003; Van der Ree *et al.*, 2011). Por su parte, los caminos transversales o perpendiculares cruzan o cortan la dirección de la pendiente y rompen la continuidad de los flujos hacia abajo, particularmente si se ubican en la parte media o alta de la ladera, con lo que afectan el flujo de materia y energía desde su origen.

A mayor densidad de caminos por tipo de geosistema, mayor la modificación de los flujos de materia-energía en la ladera y, por lo tanto, propician una mayor vulnerabilidad intrínseca, que podría incidir en el grado de afectación en caso de derrame a partir de ductos. Lo mismo sucede con los derrames de petróleo; en caso de que su arreglo sea a favor de la pendiente, aumenta el gasto

y la velocidad del flujo, mientras que en el caso de los caminos transversales o paralelos, éste tenderá a dispersarse.

b) Fragmentación.

Entre más íntegro y continuo se encuentre un geosistema, los flujos de materia-energía en su interior se llevarán a cabo de manera más apegada a las condiciones naturales o “normales” propias del área. El grado de fragmentación (Dramstad, Olson y Forman, 1996) puede calcularse por la medición de la superficie total de cada tipo de geosistema y relacionarla con el número de polígonos de vegetación natural (fragmentos) que la conforman. En caso de no contar con vegetación natural deberán considerarse otras variables para la estimación del grado de vulnerabilidad intrínseca.

A menor fragmentación de la vegetación natural (menor número de polígonos por geosistema), mayor vulnerabilidad intrínseca, ya que el geosistema que se desea proteger está más conservado. En caso de derrame de petróleo a partir de ductos, a menor fragmentación de la vegetación natural, mayor vulnerabilidad de los geosistemas.

Medio socioeconómico

Es necesario recordar que dentro de la delimitación de los geosistemas, aquellos que corresponden a asentamientos humanos con más de 15 000 habitantes son considerados asentamientos humanos urbanos, los cuales son clasificados de muy alta vulnerabilidad intrínseca dada la intención de proteger, *a priori*, a la mayor parte de la población ante cualquier amenaza. De acuerdo con cifras del último censo disponible (2010), 62.5% de la población mexicana (70.2 millones de personas) reside en localidades mayores de 15 000 habitantes (Inegi, 2011b). El resto de los geosistemas (aquellos con menos de 15 000 habitantes) se clasifican como no urbanos, y se representan cartográficamente como un área / polígono al cual será necesario asignar los datos estadísticos correspondientes, como los que proceden de los censos de población y económicos, o bien del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (Inegi, 2011b). Estos datos se asignarán en función de la coincidencia espacial / sobreposición entre estos geosistemas no urbanos y la cartografía geoestadística a la cual están referidos los datos mencionados.

Es necesario considerar la disponibilidad de información al momento de elaborar una serie de indicadores que permitan calcular el grado de vulnerabilidad intrínseca del medio socioeconómico, sobre todo en una escala de semidetalle. Ello se deriva, fundamentalmente, de lo siguiente:

1. La información estadística por utilizar debe tener, en la medida de lo posible, una cobertura nacional, a fin de garantizar la posibilidad de su cálculo en los distintos espacios del territorio nacional.
2. La información estadística está referida a la división político-administrativa básicamente en las escalas nacional, estatal y municipal, y en menor medida, a localidades, principalmente urbanas.¹³ Ello hace especialmente difícil integrar la información estadística socioeconómica a una unidad espacial (geosistema) que no se atiene a la división político-administrativa.

En el medio socioeconómico se consideran cuatro componentes básicos para el cálculo de su vulnerabilidad intrínseca en geosistemas no urbanos: la población, su patrimonio, las actividades económicas y la infraestructura física. Para el cálculo de algunos de los indicadores señalados, se tendrá en cuenta la suma de las variables correspondientes a los valores por localidad, con lo que se obtiene el indicador a nivel geosistema no urbano, a partir de las localidades ubicadas en su interior. El procedimiento para obtener los valores por geosistema se explica más adelante (integración de los indicadores). En la Figura 4.4 se presenta un esquema conceptual de las variables del medio socioeconómico.

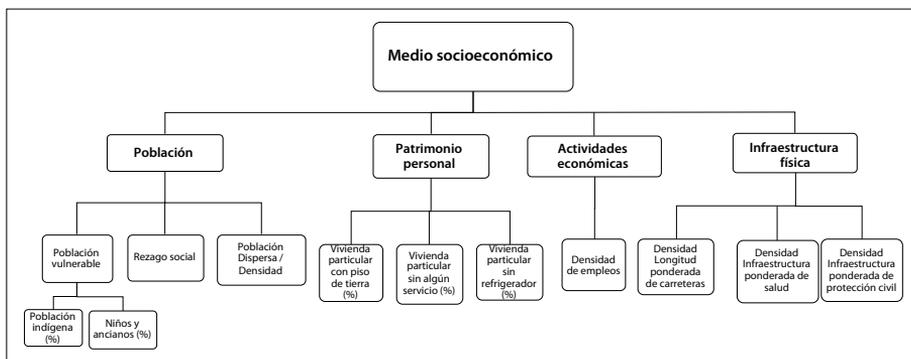


Figura 4.4. Esquema conceptual de las variables del medio socioeconómico. Fuente: elaboración propia.

¹³ De acuerdo con el criterio del Inegi se consideran urbanas todas las localidades con más de 2 500 habitantes, así como las cabeceras municipales, independientemente de su número de habitantes.

Población

A fin de valorar la vulnerabilidad intrínseca de la población, se consideran los siguientes indicadores:

a) Rezago social.

Se propone adoptar de manera directa el índice de rezago social a nivel de localidad del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval, 2011), por considerarlo un indicador sintético de la condición de vulnerabilidad de la población y por su disponibilidad para localidades no urbanas. La preferencia por el índice de rezago social sobre el índice de marginación elaborado por el Consejo Nacional de Población (Conapo) se debe a que el Coneval es el organismo oficial encargado de establecer los lineamientos y criterios para la definición, identificación y medición de la pobreza en México, de acuerdo con la Ley General de Desarrollo Social. La fuente consultada fue el anexo técnico metodológico del documento, “Los mapas de la pobreza en México” (Coneval, 2011).

El criterio propuesto es que, a mayor rezago social, mayor la vulnerabilidad intrínseca de la población, ya que cuenta con menos recursos y oportunidades para reponerse de los efectos adversos de un derrame de petróleo que afecte su persona, sus actividades y/o sus bienes.

b) Población vulnerable

Como grupos vulnerables, usualmente, se consideran la población indígena, los niños y los ancianos, por lo cual se propone el uso de los dos siguientes indicadores:

b.1 Población indígena. Este indicador podría reflejar los problemas de marginación, pobreza y dispersión que comúnmente afectan a la población indígena y, consecuentemente, su mayor vulnerabilidad intrínseca. Asimismo, tiende a relacionarse con la ubicación de población en áreas aisladas y de difícil acceso, lo que se vincula con una mayor dificultad para su evacuación o el acceso de equipo y personal para tareas de mitigación y remediación.

El criterio considerado es que, a mayor porcentaje de población hablante de lenguas indígenas, mayor será la vulnerabilidad, ya que ésta, generalmente, se encuentra en condiciones más desfavorables para recuperarse de los efectos de algún derrame de petróleo.

b.2 Niños y ancianos. Los niños y ancianos constituyen grupos de población que, por sus menores capacidades físicas, a menudo necesitan de la asistencia de otras personas, principalmente familiares, para desarrollar ciertas actividades,

obtener información, adoptar medidas preventivas ante una amenaza, transportarse para escapar de un evento dañino o para recuperar su vida cotidiana tras un desastre, entre otras. Es por ello que se reconoce como un grupo de población especialmente vulnerable.

El criterio establecido es que, a mayor porcentaje de niños y ancianos, mayor la vulnerabilidad de la población residente.

c) Población dispersa

La población dispersa se considera más vulnerable porque presenta menor capacidad de desplazamiento y de recibir apoyo tras un desastre, al ubicarse generalmente en lugares poco accesibles debido a su topografía y/o lejanía de las principales vías de comunicación (carreteras pavimentadas). Esto se vincula nuevamente con posibles problemas de evacuación de dicha población o de recibir apoyo; generalmente esta es una población con mayores índices de pobreza y marginación, por lo que se estima que, a mayor dispersión de la población, más vulnerable será.

Patrimonio

Dado que el principal patrimonio individual y colectivo de las personas y familias lo constituye principalmente su vivienda y las posesiones que en ella existen, se centra la atención en este bien, considerándose como más vulnerables aquellas viviendas que carecen de determinados bienes y servicios. Si bien en una situación de desastre dichas viviendas pudieran tener un menor costo de rehabilitación, reconstrucción o reubicación desde el punto de vista monetario, la escasez de recursos económicos de sus propietarios hace que dicha posibilidad sea menos factible.

La elaboración de un índice de consolidación de la vivienda hubiera sido deseable, pero en el Censo de Población y Vivienda 2010 (Inegi, 2011b), el cuestionario básico se limitó a preguntar acerca del material de los pisos y no de techos y paredes, preguntas que sí se incluyeron en el cuestionario ampliado; sin embargo, éste no revela la clave de localidad en el caso de localidades menores a 50 000 habitantes, por lo que esta información no está disponible para las menores a esa cantidad de habitantes. Es por ello que se proponen los siguientes indicadores:

a) Viviendas particulares habitadas con piso de tierra

La existencia de piso de tierra en las viviendas usualmente ha sido vista como un signo de pobreza y marginación, y se ha relacionado con condiciones desfavorables para la higiene y la salud de sus residentes. Asimismo, se ha asociado con

edificaciones cuyos materiales de construcción resultan endebles ante cualquier tipo de desastre y, por tanto, más susceptibles a ser dañadas. Por ello se eligió el porcentaje de viviendas con este tipo de piso como un indicador asociado a la vulnerabilidad, adoptándose el criterio de considerar más vulnerables aquellos geosistemas que ostentan un mayor porcentaje de este tipo de viviendas.

b) Viviendas particulares habitadas que no disponen de algún servicio

En este indicador se considera la carencia de uno o más servicios en las viviendas (luz eléctrica, agua potable entubada de la red pública o drenaje) por asociarse, nuevamente, con viviendas y ocupantes con mayores carencias y, por tanto, con menor capacidad de resistencia y recuperación ante una situación de desastre. El criterio adoptado es que a mayor porcentaje de viviendas sin uno o más servicios, mayor será la vulnerabilidad.

c) Viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador

La elección de este indicador se justifica por ser el más básico entre los bienes materiales de las viviendas reportadas en el censo de población. La inexistencia de este bien tiene importantes implicaciones desde el punto de vista de la conservación de los alimentos y, por tanto, de la salud de los ocupantes, por lo que su ausencia se asocia con otras carencias tanto de la vivienda (servicios o materiales de construcción) como de sus ocupantes (ingresos, educación o acceso a servicios de salud). Por estos motivos se califica como más vulnerables aquellos geosistemas donde existe un mayor porcentaje de viviendas sin refrigerador.

Actividades económicas

a) Densidad de empleos

Como indicador de la vulnerabilidad de las actividades económicas se hace uso de la variable densidad de empleo por kilómetro cuadrado, dada la limitada información disponible, como es el caso del valor catastral en áreas rurales o localidades pequeñas. Pese a ello, se alienta el posible uso de información cartográfica catastral existente (valor catastral), a fin de determinar el posible impacto que un desastre podría tener en las actividades económicas, medido, en este caso, a partir del costo de rehabilitación y/o reconstrucción de las unidades económicas afectadas.

Otra posible fuente de información para áreas rurales es la generada por los Centros de Apoyo para el Desarrollo Rural (Cader), dependientes de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), hoy Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader), los cuales suelen

disponer de información acerca de producción agrícola y pecuaria (valor de la producción) a una escala espacial más desagregada que el municipio, aunque la disponibilidad de ésta puede ser variable de acuerdo con los Cader.

Dado el problema de disponer de información económica a nivel inframunicipal, se recurre al DENUe para ubicar cada una de las unidades económicas encuestadas en los censos económicos (Inegi, 2011b), con la limitante de que esta información se levanta únicamente en localidades urbanas (criterio Inegi) y para actividades no agropecuarias ni forestales.

De las variables cuantitativas recopiladas en los censos económicos, el DENUe ofrece únicamente el rango de personal ocupado en cada unidad económica, variable que se propone utilizar. Los rangos de personal ocupado reportados son: 0-5, 6-10, 11-30, 31-50, 51-100, 101-250 y 251 y más; se propone fijar el valor medio de cada intervalo como el número de empleos existentes en cada unidad económica. Dado que el último rango es abierto, el número de trabajadores correspondiente queda a criterio de cada investigación, con lo que se logra una aproximación al mismo en el trabajo de campo.

El uso del DENUe ofrece la ventaja de ubicar de manera individual cada una de las unidades económicas, aunque otra opción para determinar el número de empleos a nivel localidad es la solicitud de esta información al Inegi, dado que dicha información, si bien se genera a partir de los censos económicos, en ocasiones no se publica con este nivel de desagregación espacial (por localidad y área geoestadística básica [AGEB] urbana).

A fin de evitar la distorsión del distinto tamaño de los geosistemas delimitados, se recomienda ponderar o dividir el número de empleos entre la superficie del geosistema en kilómetros cuadrados.

La justificación detrás del indicador propuesto es cuantificar los empleos afectados en caso de un desastre, dado que a mayor densidad de empleos afectados, el impacto del posible desastre sería mayor, por lo que se consideran más vulnerables aquellos geosistemas que presentan una mayor densidad de empleos.

Infraestructura física

Importancia de la infraestructura carretera, de salud y de protección civil

En este apartado se considera el impacto de una posible amenaza ante cierto tipo de infraestructura, de especial interés, relacionada con los derrames de hidrocarburos, como la red carretera (por su importancia en la evacuación de la población y llegada de ayuda externa para el control y la mitigación de este desastre), la infraestructura de salud (hospitales y clínicas) y la de protección civil (instalaciones consideradas como posibles albergues, estaciones

de bomberos, policía y protección civil, etcétera). Si bien se tiene en cuenta la infraestructura física, una variable que se puede considerar (y es una de las deficiencias más grandes) es la capacidad de prevención y respuesta que el gobierno brinda a la población por medio de políticas públicas de protección civil, que puede actuar favorable o desfavorablemente en la seguridad de la sociedad; se podría considerar la existencia del instrumento y el procedimiento existente.

Se trata en definitiva de infraestructura física relevante a la hora de mitigar y rehabilitar los daños ocasionados por un desastre o derrame, por lo que su destrucción parcial o total a consecuencia de un desastre llevaría a una intensificación de los efectos al disminuir la capacidad de respuesta y recuperación. La necesidad de proteger esta infraestructura a fin de mantenerla operativa en caso de un desastre lleva a considerar más vulnerables aquellos geosistemas que ostentan mayor densidad de dicha infraestructura.

Con todo lo anterior se determina la vulnerabilidad intrínseca regional, es decir, a partir de una región delimitada desde una perspectiva natural o político-administrativa (cuenca, región costera, conjunto de municipios, región industrial, etcétera). Se definen las unidades espaciales que la conforman y de manera global se establece la vulnerabilidad intrínseca de cada grupo de unidades de análisis que comprende la región.

Vulnerabilidad extrínseca

El análisis de la vulnerabilidad extrínseca no se lleva a cabo de manera regional, en este caso se evalúan las condiciones en cada polígono que corresponde a la unidad de análisis que está expuesta a un derrame.

En esta sección se describen las variables que permiten evaluar el grado de vulnerabilidad en función de la presencia o cercanía de la red de ductos de la infraestructura petrolera mexicana liderada por Pemex; esto es, la vulnerabilidad que adquiere el sistema por el grado de exposición a un peligro o amenaza y que se denomina vulnerabilidad extrínseca (Figura 4.5). Para ello, se adoptó un enfoque de análisis espacial con prioridad en los siguientes aspectos:

- Dispersión del petróleo crudo.
- Velocidad del flujo (pendiente-relieve).
- Extensión afectada (considerando el agua como vehículo principal de dispersión).

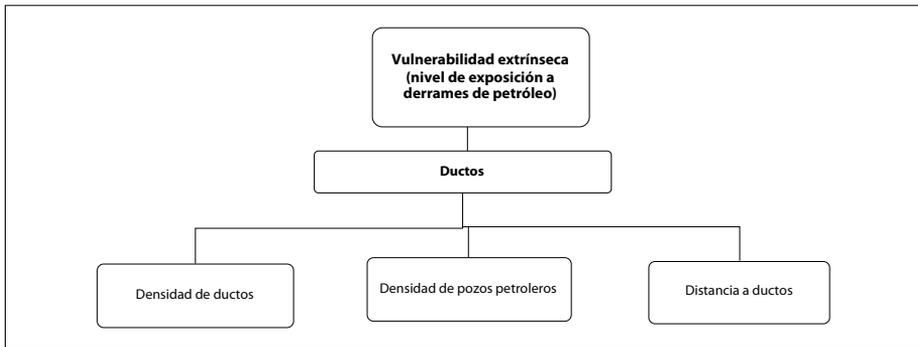


Figura 4.5. Variables de la vulnerabilidad extrínseca.

- Persistencia del petróleo crudo en el sitio.
- Entrampamiento (permeabilidad del terreno y accesibilidad al sitio para su limpieza).

Estas consideraciones permitirán, a su vez, establecer *grosso modo* el tipo de atención requerida:

- Atención inmediata, tratándose de sitios de alta velocidad de dispersión y amplia extensión afectada.
- Atención más lenta o tardada, en el caso de terrenos de difícil acceso o de alta permeabilidad.

Para evaluar la vulnerabilidad extrínseca se considera la métrica espacial entre los componentes del geosistema y la presencia de ductos teniendo en cuenta las siguientes variables:

Densidad de ductos

Se refiere a la relación de la longitud de ductos (en km) por unidad de superficie (1000 x 1000 m) para cada polígono que esté expuesto a derrames.

El criterio para evaluar la vulnerabilidad es: a mayor densidad de ductos dentro de un polígono correspondiente a una unidad espacial de análisis (geosistema), mayor su vulnerabilidad extrínseca, debido a que hay mayor posibilidad de exponerse a un derrame.

Distancia a ductos

Para esta variable se mide el valor más frecuente (moda) de la distancia (en m) que existe entre la línea de ductos de las empresas petroleras y la traza urbana, los cauces fluviales, cuerpos de agua superficiales y caminos, que son los elementos que se considera deben estar más alejados de los ductos para que una población no sufra daños, o que permiten la mayor dispersión del crudo en caso de que el producto de un derrame llegue a cuerpos de agua, cauces fluviales o caminos (el derrame puede obstruir las rutas de evacuación, que el flujo adquiera mayor velocidad o provocar que se estanque). A menor distancia de los ductos a la traza urbana, los cauces fluviales, cuerpos de agua superficiales y caminos, mayor vulnerabilidad extrínseca del polígono del geosistema que presenta esta condición.

Densidad de pozos petroleros

Es el número de pozos de petróleo por unidad de área. Se evalúa de acuerdo con el número de pozos petroleros en una superficie de 1000 x 1000 m en cada polígono expuesto a un derrame por pozos. El criterio se define así: a mayor número de pozos petroleros dentro de un polígono por geosistema, mayor vulnerabilidad extrínseca, debido a que aumenta la posibilidad de un derrame de crudo.

Capítulo 5. Métodos de integración de resultados

Pilar Fernández Lomelín, Irene Sommer Cervantes

Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco

Departamento de Geografía Física

Instituto de Geografía, UNAM

José María Casado Izquierdo

Ma. Teresa Sánchez Salazar

Departamento de Geografía Económica

Instituto de Geografía, UNAM

Para estimar la vulnerabilidad de una unidad espacial determinada ante una amenaza a partir de los resultados derivados del análisis de una serie de variables, se requiere del uso de métodos que permitan la integración y síntesis de la información con el objeto de permitir una comparación entre las unidades espaciales (en este caso, entre los geosistemas), así como una priorización de los riesgos.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) (Smith, Tran y O'Neill, 2003), en su esquema para la evaluación de la vulnerabilidad regional, propone diversos métodos alternativos para realizar la integración final de resultados y obtener el ordenamiento de los geosistemas en función de su grado de vulnerabilidad.

Los métodos propuestos van de los más sencillos a los más complicados. Se recomienda adoptar aquel método que sea, a la vez, más fácil y práctico para el equipo de trabajo, pero que arroje los resultados más precisos y confiables posibles. También se recomienda realizar al menos dos estimaciones por métodos diferentes con el fin de evaluar la consistencia de los resultados obtenidos.

Para la elaboración de esta guía se adoptó uno de los métodos intermedios, esto es, no muy difícil de practicar, pero que arroja resultados relativamente confiables: el Procedimiento de Análisis Jerárquico (PAJ).¹⁴

¹⁴ Para confirmar resultados se puede recurrir a alguno de los otros métodos recomendados por la USEPA (Smith, Tran y O'Neill, 2003).

El PAJ es un método que permite abordar el problema de decisión multicriterio de una forma sistemática utilizando comparaciones entre pares de elementos. A partir de estas comparaciones se construyen matrices y, con diversos cálculos, se establecen prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento de un nivel inmediato superior (Osorio y Orejuela, 2008).

El PAJ es particularmente útil porque:

- Es un método de comparación relativo (entre las unidades estudiadas), por lo que es una alternativa de análisis cuando no se tienen prototipos de comparación (áreas prístinas).
- Permite mezclar información métrica y categórica.
- Traduce experiencia de expertos a valores.
- La asignación de pesos es relativamente objetiva.
- Es flexible al permitir aumentar o reducir el número de niveles jerárquicos a analizar.
- Se obtiene un índice final, pero se pueden “reconstruir” sus componentes al analizar los pesos.
- Los cálculos son fáciles de entender y realizar.
- Ha tenido muchísima aceptación y, por tanto, pueden compararse resultados de diferentes investigaciones.

Procedimiento de Análisis Jerárquico (PAJ)

Una vez estimada la vulnerabilidad por tipo de geosistema para cada variable o índice seleccionados, se procede a aplicar un método de integración de los resultados que permita estimar la vulnerabilidad intrínseca por tipo de geosistema.

En la Figura 5.1 se muestran los cinco pasos que se deben seguir para aplicar este procedimiento.

Construcción del modelo-esquema jerárquico

Para la construcción del modelo se llevan a cabo las siguientes acciones:

Primer nivel. Se define claramente el objetivo del trabajo y se coloca como primer elemento del esquema. En este caso, el objetivo es el establecimiento de la vulne-

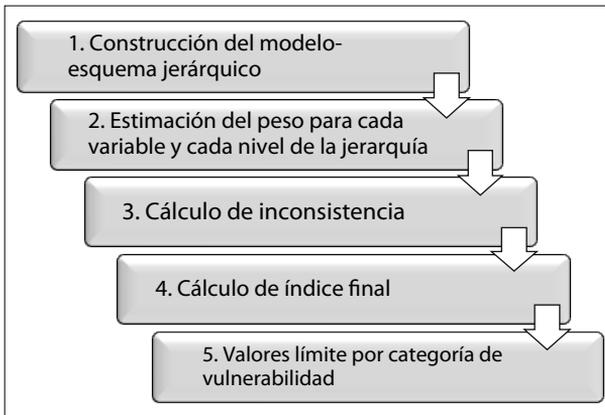


Figura 5.1. Pasos del Procedimiento de Análisis Jerárquico. Fuente: elaboración propia con base en Banai-Kashani, 1989.

rabilidad regional a derrames de petróleo crudo a partir de oleoductos, con base en los diferentes tipos de geosistema identificados en el área de estudio.

Segundo nivel. De acuerdo con el modelo de vulnerabilidad regional adoptado, se identifican dos fuentes de información: las que conciernen a la vulnerabilidad intrínseca y las correspondientes a la vulnerabilidad extrínseca (la amenaza) (Figura 5.2). Es conveniente que esta última se estime por polígono y tipo de geosistema, y en relación con la amenaza. Cabe mencionar que en esta guía sólo se realiza una aproximación en función de la densidad de ductos, ya que se cuenta con muy poca información. Si se tiene información acerca de la exposición, podrá incluirse en este nivel.

Tercer nivel. Para la estimación de la vulnerabilidad intrínseca se subdividen las unidades identificadas en el nivel jerárquico anterior en sus componentes; en este caso, corresponden al medio biofísico y al medio socioeconómico (Figura 5.2).

Cuarto nivel. Si se requiere, se estructuran otros niveles jerárquicos, como se ejemplifica en el esquema (Figura 5.2), en el que, para el medio biofísico, se organizan las variables que caracterizan los subcomponentes abiótico, biótico y antrópico que, a su vez, se dividen considerando diversas variables. Para el subcomponente abiótico se consideran las variables que tienen que ver con la estructura espacial, que corresponden al potencial de erosión, la litología, la morfometría y la morfografía. En cada uno de estos apartados se anidan las variables o índices correspondientes, como puede observarse en la Figura 4.1. En la Figura 4.4 se

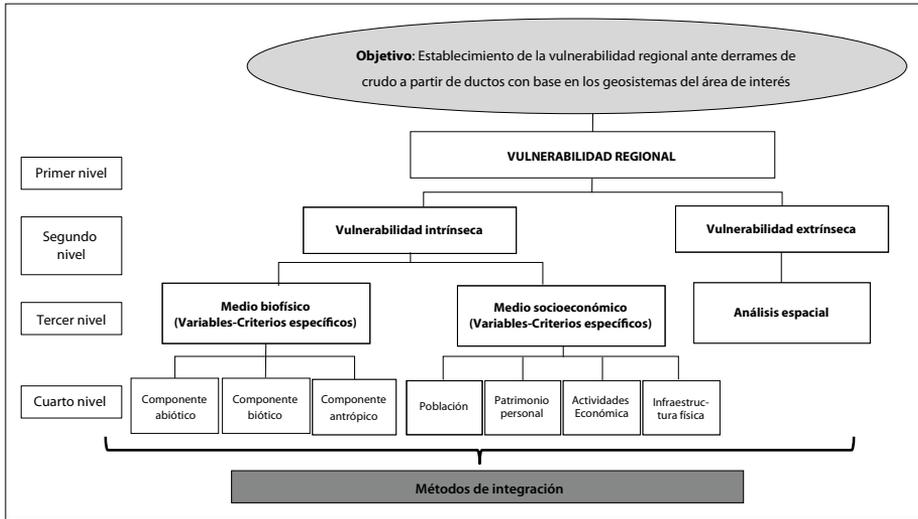


Figura 5.2. Modelo-esquema jerárquico de la vulnerabilidad regional. Fuente: elaboración propia.

encuentra un diagrama de indicadores y categorías propuestos para el medio socioeconómico.

Estimación de los pesos para cada variable y cada nivel de la jerarquía

Este paso se hace mediante la construcción de matrices, producto de las comparaciones pareadas para cada uno de los elementos que conforman un nivel jerárquico; es decir, para las variables en sí mismas o para el conjunto de geosistemas a evaluar. Para ello, se siguen los pasos del PAJ descritos en el Capítulo 8 (al final de éste se presentan matrices como ejemplos). Se emplea la escala de valores elaborada por Banai-Kashani (1989), que se basa en el uso de una escala de 9 puntos para asignar un número que, entre mayor sea, representará una mayor diferencia al comparar dos elementos.

Cálculo de inconsistencia

Una vez obtenidos los pesos o calificaciones para cada uno de los elementos que se requieren para la evaluación, se debe verificar que el índice de inconsistencia en cada una de las matrices sea menor a 10%. Normalmente, cuando se hacen comparaciones múltiples, llega un momento, al aumentar el número de elementos a comparar, en que puede haber confusión y los valores que se asignan a las com-

paraciones pierden su lógica interna y se introducen inconsistencias en los datos. Esto es normal hasta cierto punto, pero se pretende que haya los menores errores posibles, y para esto se recurre al cálculo del índice de inconsistencia interna descrito en el paso 3 del Capítulo 8.

Calculo de índice final

El peso calculado para cada tipo de geosistema se multiplica por el peso de su correspondiente variable y se suman los valores ponderados de dichas variables para obtener la calificación final por geosistema. Estas calificaciones finales permiten establecer la secuencia de vulnerabilidad.

Valores límite por categoría de vulnerabilidad

Se refiere a la definición de los puntos de corte por categoría de vulnerabilidad. Para establecer estos puntos se recurre a normalizar el rango de valores obtenido para la calificación final y dividirlo en tres categorías (bajo, moderado, alto) o cinco (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto).

Parte II

La Parte II es considerada la parte técnica de este documento, en la cual se indican los insumos necesarios para elaborar los mapas que se proponen. Se describen los métodos de medición de variables e indicadores para estimar la vulnerabilidad del medio biofísico y del socioeconómico por geosistema (Capítulos Métodos de medición de variables e indicadores: Vulnerabilidad intrínseca del medio biofísico y Métodos de medición de variables e indicadores: Vulnerabilidad intrínseca del medio socioeconómico y vulnerabilidad extrínseca) y se termina con un análisis multicriterio para la integración de resultados (Capítulo Procedimiento de Análisis Jerárquico). Cabe mencionar que la vulnerabilidad extrínseca se estima de manera individual, es decir, por polígono y por tipo de geosistema en relación con la amenaza, en este caso se utiliza la red de oleoductos como variable en el geosistema pastizal, a manera de ejemplo. Finalmente, se incluye una serie de conclusiones y recomendaciones para el uso de esta guía.

Capítulo 6. Métodos de medición de variables e indicadores: Vulnerabilidad intrínseca del medio biofísico

Mayelli Hernández Juárez
Posgrado de Geografía, UNAM

Jean-François Parrot Faure
Laboratorio de Análisis Geoespacial
Instituto de Geografía, UNAM

Oralia Oropeza Orozco
Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, UNAM

El problema de estimar la sensibilidad-vulnerabilidad ambiental ante algún tipo de amenaza es bastante complejo, dado que no es una característica que se puede medir directamente, ya que concurren muchas variables y situaciones específicas; por ejemplo, el enfoque del problema dado por la visión del personal involucrado (diversidad de criterios u opiniones) y su grado de participación y responsabilidad en las acciones a tomar. Otras consideraciones que deben tenerse en cuenta son las limitantes impuestas por la calidad y cantidad de información adecuada y disponible, así como las que se refieren a la escala de medición en la que se reporta la información de base (cualitativa o cuantitativa) y las de la escala geográfica seleccionada.

Según el alcance del trabajo, el procedimiento para estimar la vulnerabilidad regional o global puede ser aplicado considerando grupos de unidades espaciales (agrupados por tipos de paisajes, tipos de geosistemas, etcétera) o cada unidad espacial (por ejemplo, cada polígono), con el detalle que se requiera.

Para ejemplificar la aplicación del método y describir cada uno de sus pasos se seleccionaron como unidades espaciales de análisis los geosistemas diferenciados por tipos para estimar la vulnerabilidad global intrínseca, y como región de estudio, una de las zonas de interés prioritario por la ocurrencia de derrames de petróleo que corresponde a una parte del municipio de Poza Rica, Veracruz, y los

contiguos de Coatzintla, Tihuatlán y Venustiano Carranza, así como una pequeña superficie del municipio de Papantla (en adelante región Poza Rica o área de estudio) (Figura 6.1). En esta área de estudio se analizaron variables tales como la morfología del terreno, la geología, las particularidades de su superficie (po-

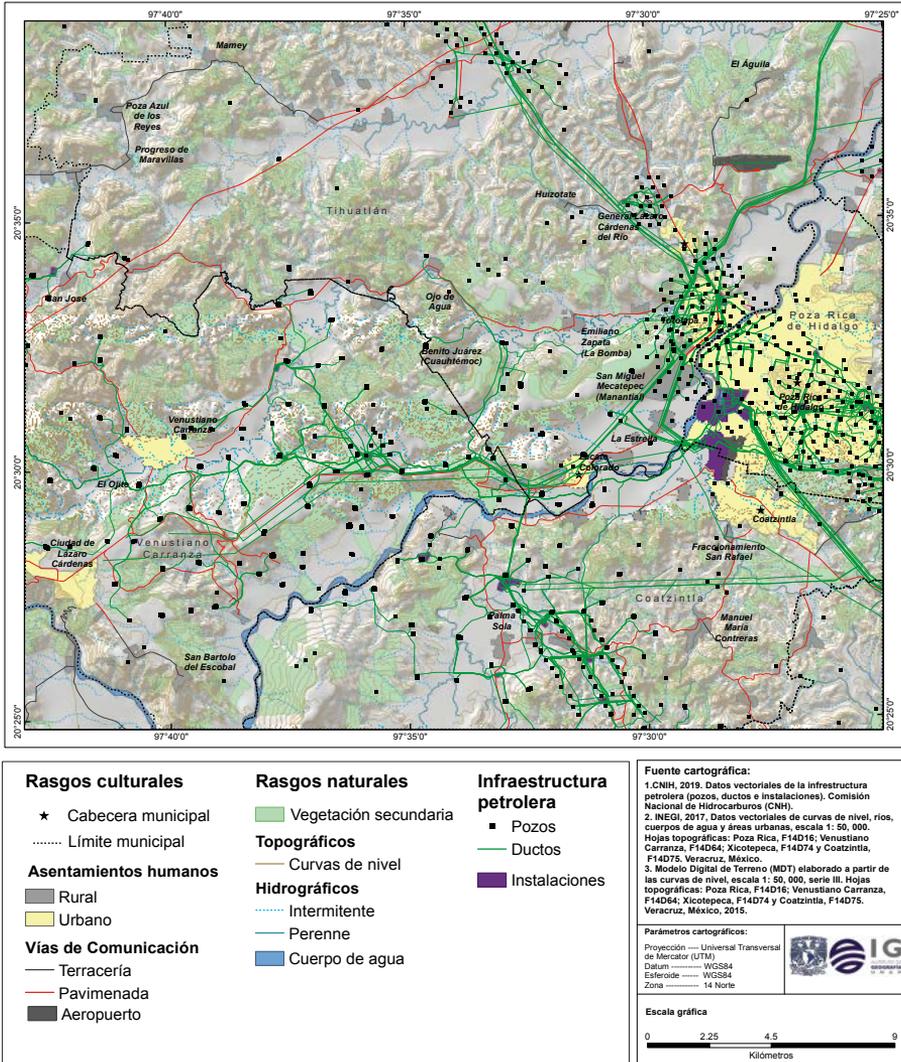


Figura 6.1. Localización del área de estudio, Poza Rica, Veracruz. Fuente: Elaboración propia con base en CNIH, 2019, INEGI, 2017, INEGI, 2015, editado por el Instituto de Geografía, UNAM.

tencial de erosión, cobertura vegetal) y algunas socioeconómicas. Para estimar la vulnerabilidad extrínseca se eligió como amenaza el derrame de crudo a partir de oleoductos, por lo que otras variables analizadas incluyen la red de oleoductos que atraviesan los citados municipios, la densidad de pozos petroleros y la distancia a las poblaciones o a sitios estratégicos, entre otras. En este ejercicio, las unidades espaciales elegidas para estimar la vulnerabilidad extrínseca son los geosistemas individuales (polígonos), ya que ésta relaciona la exposición del geosistema a las condiciones de una amenaza específica, en este caso, los derrames de crudo a partir de oleoductos. La variable elegida para estimar la vulnerabilidad extrínseca y mostrar la aplicación del método es la densidad de ductos.

Con estos términos se presenta una aproximación de un diseño metodológico que integra las variables que se consideran en este libro.

Como paso previo a la medición de variables, para la estimación de la vulnerabilidad por tipo de geosistema y por geosistema individual, es necesario considerar los diferentes tipos de escalas espaciales y la cartografía temática que se emplean en el análisis, así como otros aspectos que se detallan en los siguientes párrafos.

Con respecto a las escalas:

- a) Se parte del análisis de la cartografía temática a escala regional (1:250 000): geología, clima, hidrología, suelos, vegetación y uso de suelo.
- b) La escala operacional es 1:50 000, la base a partir de la cual se genera nueva información y se aplican las variables utilizadas se construye con las cartas topográficas. Se apoya con información acerca de tipología de vivienda, aspectos demográficos y socioeconómicos por Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), servicios y equipamiento urbano y rural, así como infraestructura petrolera.

Para representar la vulnerabilidad de los geosistemas se utiliza un modelo de jerarquías en cinco categorías (*p. ej.* muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo).

En relación con las fuentes de información, imágenes y *software*, la cartografía base que se utiliza proviene de fuentes oficiales, como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Consejo Nacional de Población (CONAPO) y la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP). Las imágenes pueden obtenerse del Inegi, la Secretaría de Marina (SEMAR) y el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra del Instituto de Geografía, entre otras instituciones. Las imágenes SPOT que se utilizaron en este ejercicio se obtuvieron de la SEMAR.

Se recomienda tener experiencia en el manejo de programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) comerciales o libres para la manipulación de datos geoespaciales de tipo vectorial y matricial (raster), así como imágenes satelitales, entre otros.

Cabe mencionar que para el geoprocesamiento de las imágenes pueden utilizarse los programas (*software*) con los que se esté familiarizado y que sirvan para tal fin. En este texto se sugieren algunos programas, como el *software* comercial ArcGis y los elaborados por el Dr. Parrot del Instituto de Geografía de la UNAM, que son de acceso gratuito, por mencionar algunos.

Como se recordará en la primera parte de esta guía, el análisis considera, por un lado, el medio biofísico y, por el otro, el socioeconómico (véase Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad, Sección Vulnerabilidad intrínseca). A continuación se describe cómo se estima la vulnerabilidad intrínseca regional o global por tipo de geosistema del área de estudio, considerando cada una de las variables seleccionadas. Posteriormente, se aborda el tema de integración de los resultados por medio del procedimiento de análisis jerárquico. Con los resultados obtenidos se presentan, para cada variable, mapas que muestran áreas con diferentes categorías de vulnerabilidad (vulnerabilidad comparada entre tipos de geosistemas dentro del área de estudio). Después se estima la vulnerabilidad específica o extrínseca, misma que se maneja en un nivel más detallado, pues se lleva a cabo considerando sólo las unidades espaciales que están expuestas a una amenaza.

Para la realización de los mapas de vulnerabilidad se generan las siguientes capas (primarias y secundarias) de información:

1. Curvas de nivel: se obtienen del mapa topográfico del INEGI para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE); en este caso, el tamaño del píxel fue de 10 m. Existen varios programas que permiten obtener un MDE de mayor precisión (escala hipsométrica en milímetros)¹⁵, de acuerdo con el nivel de abstracción que se requiera, por ejemplo, con el programa DEMONIO (Parrot, 2012b), con diversos módulos ejecutables (Brod4_Mx (Parrot, 2005), Miel4_Mx (Parrot, 2003) y NewMiel_V2 (Parrot, 2012a)) o con el *software* comercial Arc Map 10.2.2.
2. A partir del MDE se obtienen las capas de información para las siguientes variables: pendiente mayor a 18°, red de drenaje, densidad de disección, densidad de cabeceras y laderas convergentes.

¹⁵ Escala hipsométrica: representación de las formas del relieve por gradientes de color con una precisión milimétrica.

3. Resistencia de las rocas a la erosión fluvial: con base en la carta geológica del Inegi.
4. Vegetación activa: con base en el cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) sobre una imagen SPOT multiespectral de 2011 (SPOT, 2011) con una resolución espacial de 10 metros.
5. Densidad o concentración de la vegetación activa: se obtiene a partir de la imagen del NDVI, con el uso de un *software* libre (Density_V2) (Parrot, 2011) que calcula la densidad a través del uso de patrones, con lo que se genera una imagen definida en porcentajes.
6. Fragmentación: se basa en la transformación logarítmica de los valores anteriores con la finalidad de diferenciar los geosistemas con valor alto de fragmentación.
7. Densidad de ductos: se genera a partir de una ventana móvil de 1 km² en el programa Density_V2 (Parrot, 2011).
8. Distancia de ductos: se calcula con base en los geosistemas que se encuentran a una distancia mínima de 50 m de los ductos, pues estos geosistemas serían los más afectados en caso de un derrame.
9. Densidad de pozos y densidad de caminos: se obtienen a partir de una retícula móvil de 1 km².
10. Unidades de Terreno: se generan a partir de la clasificación de Ortiz-Pérez (1998) y de la interpretación de la topografía, la geología, la fisiografía y la geomorfología del área de estudio.
11. Unidades espaciales (geosistemas por polígonos): provienen de la interpretación visual o clasificación por objeto a partir de una imagen de satélite SPOT Multiespectral (SPOT, 2011) con una resolución espacial de 10m. Sobre ésta se trazaron polígonos mediante un compuesto de color de tres bandas de la imagen (B4:R, B3:G y B2:B), que representa la capa base sobre la cual se definirá la vulnerabilidad. Después de trazar los polígonos y atribuir un código por tipo de geosistema identificado, la capa se transforma en una imagen de tipo raster (geosistemas.raw) y en un archivo descriptivo (geosistemas.txt), que contiene las características de la imagen, como los números de línea, columnas y *bytes*, así como la escala de observación con base en el tamaño del píxel (resolución espacial) en metros (Figura 6.2).

El resultado de los puntos 7, 8 y 9 son capas de polígonos que representan la delimitación de las densidades y distancias de cada variable.

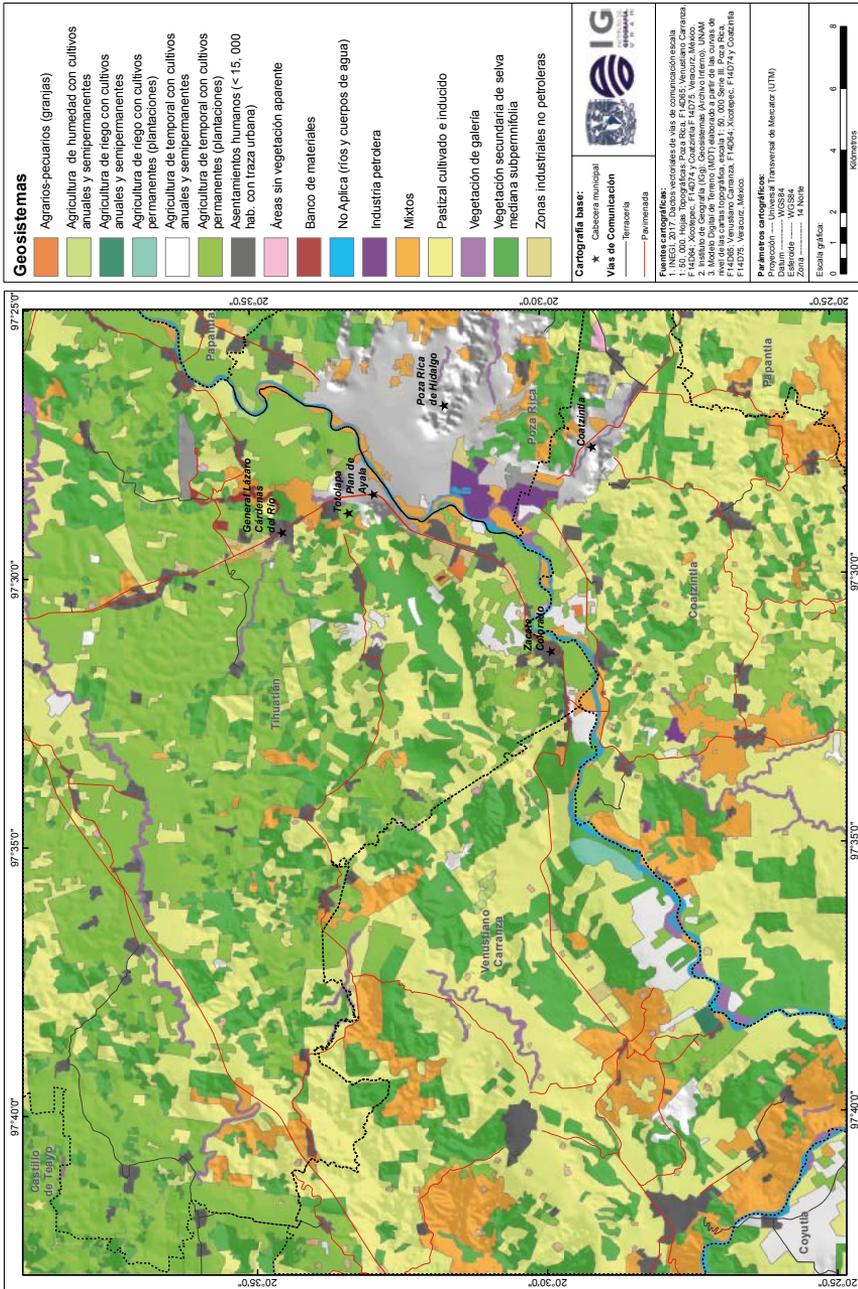


Figura 6.2. Geosistemas en el área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en la imagen satelital SPOT (2011).

Las herramientas y las fuentes de información mínimas para elaborar el mapa de geosistemas son las siguientes:

1. Imágenes satelitales (Landsat, Spot), fotografías aéreas, videografía e imágenes de Google Earth.
2. Carta topográfica en formato impreso o digital del Inegi.
3. Cartas temáticas en formato impreso o digital del Inegi: geológicas, geomorfológicas, de suelos, vegetación y uso del suelo.
4. Documentos bibliográficos y hemerográficos.
5. Bases de datos con información de las variables que se requieren en el estudio (*p. ej.* INEGI y CONAPO)
6. Trabajo de campo
7. Integración, manejo y análisis de la información en Softwares de Información Geográfica de uso libre y comercial (SIG).

En el área de estudio se identificaron 862 polígonos que corresponden a 17 tipos de geosistema (véase la Sección Unidad de análisis: geosistema de Parte I del libro, Tabla 6.1 y Figura 6.2).

Cabe mencionar que, por cuestiones prácticas, los resultados de las variables se estimaron por tipo de geosistema, y son de carácter global, por lo que sólo aplican para el grupo que se estudia. Por lo anterior se optó por reagruparlos en nueve categorías (de acuerdo con el segundo, el tercer y el cuarto orden jerárquico), las cuales se distinguen por su influencia principal (tecnógenos, agrarios y terrestres; véase Capítulo Identificación y delimitación de unidades territoriales/Unidad de análisis: geosistema), como se muestra en la Tabla 6.1. Cabe reiterar que

Tabla 6.1. Tipos de geosistema en el área de estudio.

Orden	1°	2°	3°	4°
Geosistemas principales	Geosistemas antrópicos (transformados)	Tecnógenos	Industriales	1. Banco de materiales
				2. Industria petrolera
				3. Zonas industriales no petroleras
				4. Área sin vegetación aparente
				5. Agrarios-pecuarios (granjas)
				6. Asentamientos urbanos con <15 000 habitantes Asentamientos humanos con >15 000 habitantes*

Tabla 6.1. Continúa.

Orden	1°	2°	3°	4°
Geosistemas principales	Geosistemas antrópicos (transformados)	Agrarios	Agricultura de humedad	7. Con cultivos anuales y semipermanentes
			Agricultura de riego	8. Con cultivos anuales y semipermanentes
		Agrarios	Agricultura de temporal	9. Con cultivos permanentes (plantaciones)
				10. Cultivos anuales y semipermanentes
				11. Cultivos permanentes (plantaciones)
	Geosistemas mixtos			12. Pastizales cultivados e inducidos
	Geosistemas naturales y semitransformados	Terrestres	Factores bioclimáticos	13. Combinaciones de todo tipo de geosistemas
				14. Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia
			Factores hídricos	15. Vegetación de galería
				16. Ríos y lagunas*
			17. Represas, estanques y bordos*	

*Se debe recordar que algunos geosistemas se califican *a priori* como de muy alta vulnerabilidad (Véase Capítulo Evaluación de la vulnerabilidad: unidades de estudio, Vulnerabilidad *a priori* de la Parte I), por lo que se excluyen en los siguientes análisis.

Fuente: elaboración propia con datos de Cram *et al.* (2010).

los cálculos no se realizan por polígono, pero si se considera necesario, el procedimiento se puede llevar a cabo de manera individual.

Así, los geosistemas identificados (unidades espaciales de trabajo) en el área de estudio quedaron de la siguiente manera:

1. Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente.
2. Asentamientos humanos con <15 000 habitantes, con traza urbana.
3. Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones).

4. Agricultura de temporal anual y semipermanente.
5. Agricultura de temporal permanente (plantaciones).
6. Pastizal cultivado e inducido.
7. Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos.
8. Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia.
9. Vegetación de galería.

Los valores de las variables y la vulnerabilidad intrínseca asociada se obtienen siguiendo los procedimientos descritos a continuación.

Las variables analizadas se agrupan en tres subcomponentes: abiótico, biótico y antrópico (Véase el diagrama de indicadores y categorías propuestos para estimar la vulnerabilidad del medio biofísico en la Figura 4.1).

Componente abiótico

El componente abiótico comprende la estimación de la vulnerabilidad en función del potencial de erosión fluvial de las unidades de terreno, la litología, la morfología y la morfografía, que se describen más adelante (Véase Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad/Vulnerabilidad intrínseca/Medio Biofísico/Componente abiótico).

a). Potencial de erosión fluvial de las unidades de terreno

El primer paso consiste en elaborar un mapa en el que se identifiquen las diferentes unidades de terreno en el área de estudio, el cual se basó en la clasificación de Ortiz-Pérez (1998) (Figura 6.3). Este mapa se realiza a partir de las curvas de nivel cada 20 m de la carta topográfica del INEGI (2010a) (escala 1:50 000) y la interpretación de procesos funcionales que interactúan con las formas del relieve.

Para la generación de la capa espacial del potencial de erosión se toma como base la Tabla 4.1 (Véase los tipos de unidades de terreno y su potencial de erosión en el Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad) y la capa de unidades de terreno para clasificarla según el potencial de erosión (muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo) (Figura 6.4).

El siguiente paso consiste en relacionar el mapa del potencial de erosión con la capa de geosistemas (Figura 6.2), para lo cual es necesario hacer un geoprocésamiento de identidad (Ching, 2015), que consiste en relacionar espacialmente dos capas o variables conservando sus atributos como la forma, el tamaño y la superficie, entre otros. En este caso, dicho geoprocésamiento permitirá identificar

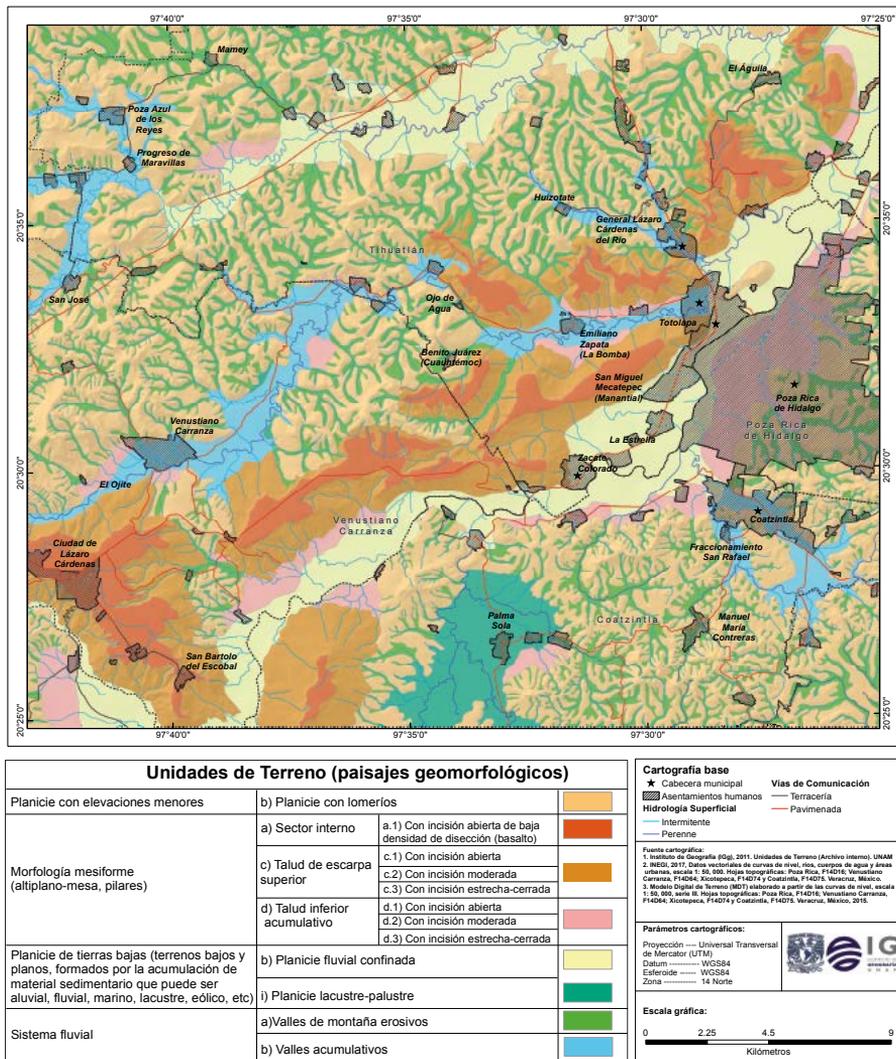


Figura 6.3. Unidades de terreno (paisajes geomorfológicos) identificadas en el área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en los datos vectoriales de INEGI (2011).

qué geosistemas y cuánta de su superficie se encuentran en cada polígono clasificado con determinado potencial de erosión. Para ello, en este estudio se utiliza la herramienta Identity (Identidad) del programa ArcMap, Versión 10.2.2, para conocer la intersección geométrica de los geosistemas con los polígonos de la capa

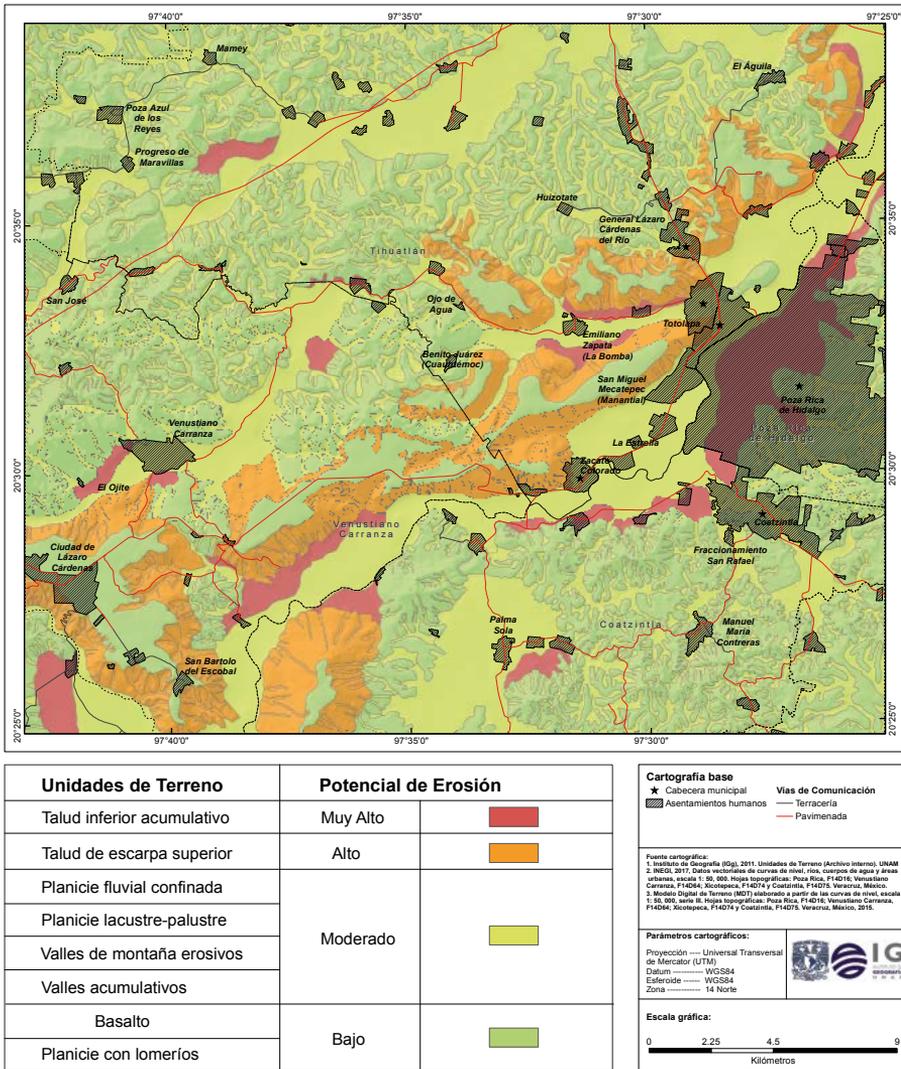


Figura 6.4. Potencial de erosión de las unidades de terreno en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

de potencial de erosión (Figura 6.5), lo que permite calcular las superficies (km²) y los porcentajes que ocupan dichos polígonos en cada geosistema. Con este geoprocesamiento se genera una base de datos que contiene las características y los cálculos de la variable a analizar, por lo que se pueden hacer también análisis geo-

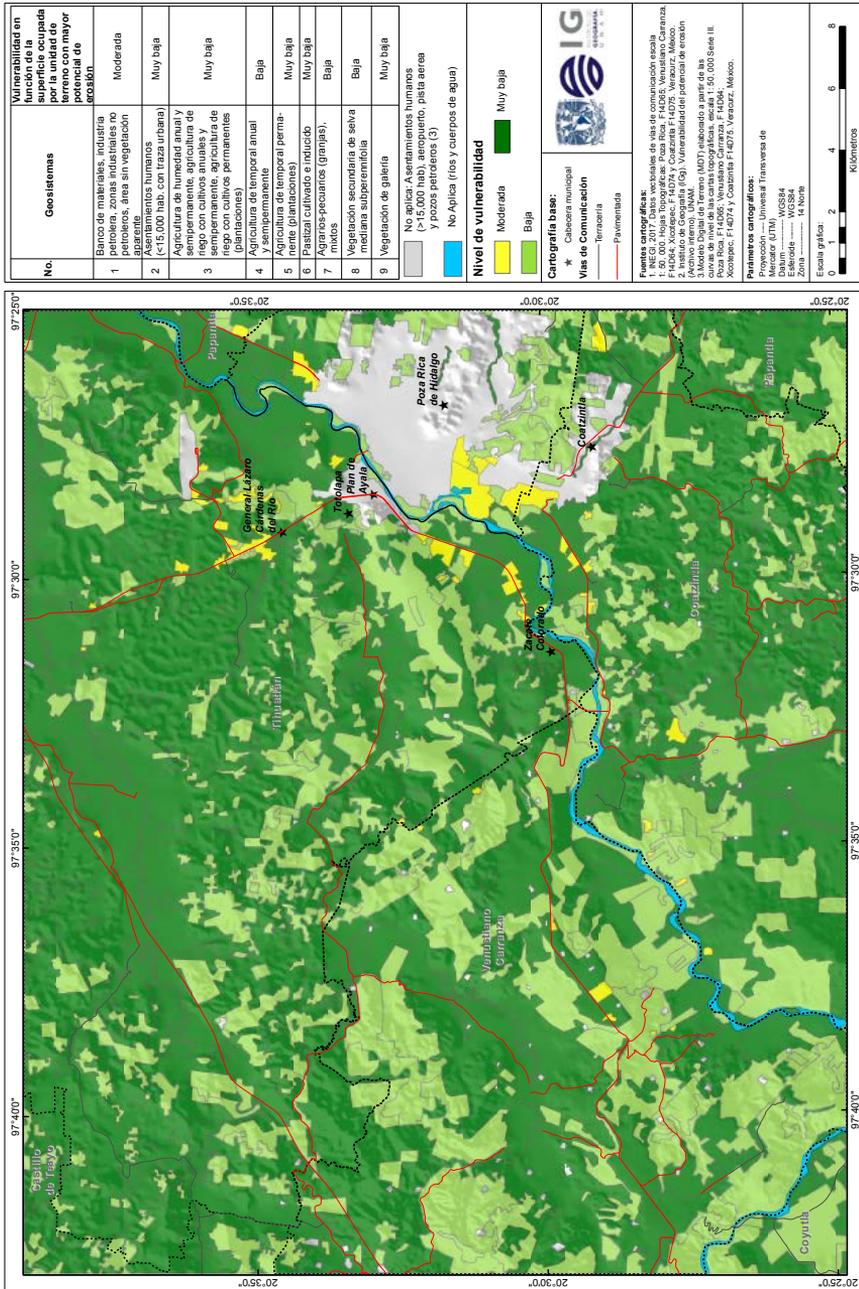


Figura 6.5. Vulnerabilidad en función del potencial de erosión fluvial por tipo de geosistema. Fuente: elaboración propia.

estadísticos exportándolos a programas estadísticos, tales como Excel, SPSS y R, entre otros.

Finalmente, se calcula el área que ocupan las unidades de terreno con mayor potencial de erosión alto y muy alto por tipo de geosistema, con base en la Tabla 4.1 (Tabla 6.2).

Para señalar qué tan vulnerables son los geosistemas ante este tipo de procesos, se establecieron los siguientes criterios (Tabla 6.3), que toman en cuenta el porcentaje que ocupan las unidades de terreno con mayor potencial de erosión por tipo de geosistema.

En la Tabla 6.4 se establece la categoría de vulnerabilidad según los criterios mencionados.

Como paso final, se elabora un mapa considerando la vulnerabilidad de los geosistemas en función del potencial de erosión fluvial (Figura 6.5) y se interpre-

Tabla 6.2. Superficie ocupada por las unidades de terreno con mayor potencial de erosión, por tipo de geosistema.

Categorías	Geosistema	Superficie total del geosistema (km ²)	Talud de escarpa superior*		Talud inferior acumulativo**	
			km ²	(%)	km ²	(%)
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	9.27	0.51	5.53	3.26	35.13
2	Asentamientos humanos con <15 000 habitantes, con traza urbana	23.07	1.07	4.6	2.14	9.27
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	2.71	0.08	3.01	0.31	11.56
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	17.79	1.60	8.98	4.83	27.13
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	197.41	10.47	5.30	5.43	2.75
6	Pastizal cultivado e inducido	276.24	31.53	11.42	10.37	3.75

Tabla 6.2. Continúa.

Categorías	Geosistema	Superficie total del geosistema (km ²)	Talud de escarpa superior*		Talud inferior acumulativo**	
			km ²	(%)	km ²	(%)
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	70.25	13.61	19.37	1.90	2.70
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	163.25	42.09	25.78	2.33	1.43
9	Vegetación de galería	9.88	0.18	1.83	0.07	0.69

*Potencial de erosión alto. ** Potencial de erosión muy alto.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.3. Categoría de vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por la unidad de terreno con mayor potencial de erosión por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de la superficie ocupada por la Unidad de Terreno con mayor potencial de erosión (alto y muy alto), por tipo de geosistema
Muy baja	< 20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

ta: a mayor superficie ocupada por la unidad de terreno con mayor potencial de erosión fluvial, por tipo de geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca debido a que hay un mayor potencial de pérdida de materiales por estos procesos.

b) Litología

Para la creación de la capa espacial por tipo de roca dominante se toma como base la carta geológica, escala 1:250 000, hojas: Poza Rica y Papantla (Figura 6.6) (SPP, 1983). Aunque en principio se debe manejar información a la misma escala de trabajo, en este caso, dado que no existe información disponible a la escala

Tabla 6.4. Vulnerabilidad de los geosistemas en función de la superficie ocupada por la unidad de terreno con mayor potencial de erosión fluvial (alto y muy alto).

Núm. geosistema	Geosistema	Superficie con el potencial de erosión fluvial alto y más alto por tipo de geosistema*		Categoría vulnerabilidad
		km ²	(%)	
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	3.77	40.66	Moderada
2	Asentamientos humanos con <15 000 habitantes, con traza urbana	3.21	13.91	Muy baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0.39	14.57	Muy baja
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	6.42	36.11	Baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	15.90	8.06	Muy baja
6	Pastizal cultivado e inducido	41.90	15.17	Muy baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	15.51	22.07	Baja
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	44.42	27.21	Baja
9	Vegetación de galería	0.25	2.52	Muy baja

*Talud de escarpa superior (potencial de erosión alto) y talud inferior acumulativo (muy alto).

Fuente: elaboración propia.

1:50 000, se utilizó una escala regional (1:250 000) y se cotejó su correspondencia con apoyo en otros aspectos como el reconocimiento del relieve, los procesos geomorfológicos y la litología en campo. Sobre esta capa se identifican los tipos de roca y se clasifican según su resistencia a la erosión fluvial (véase Tabla 4.2 del Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad de la Parte I).

En este caso, la Figura 6.7 muestra la resistencia del tipo de roca a la erosión fluvial; sin embargo, se interpreta en sentido opuesto, es decir, a menor resistencia de la roca a la erosión fluvial, mayor su fragilidad. De esta manera, los depósitos aluviales en el área de estudio tienen muy baja resistencia a la erosión fluvial y

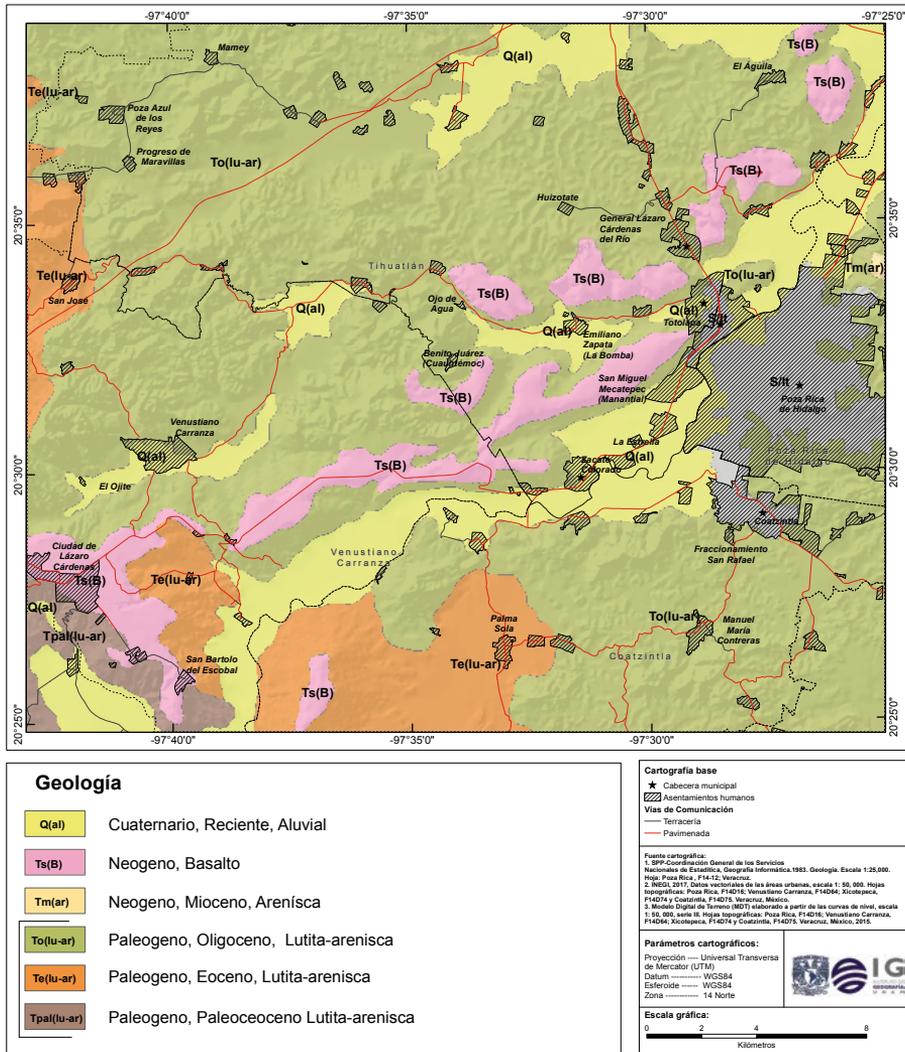


Figura 6.6. Carta geológica. Fuente: SPP (1983).

cubren 16% de la superficie total; por otro lado, con un grado de resistencia baja se encuentran las lutitas-areniscas, que ocupan aproximadamente 75%.

Posteriormente, se genera una base de datos que expresa los resultados de la relación entre los geosistemas y la resistencia de la roca en función de la erosión fluvial, los cuales se reflejan en la Tabla 6.5.

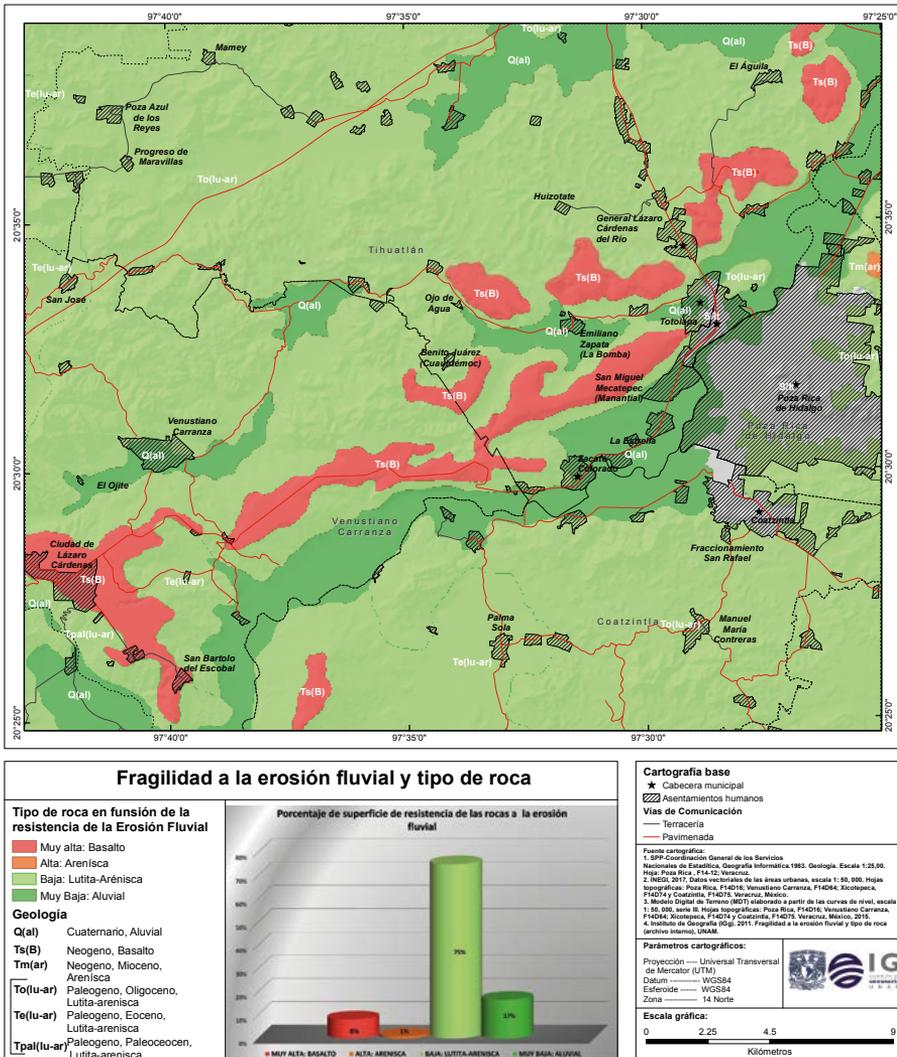


Figura 6.7. Grado de resistencia por tipo de roca a la erosión fluvial. Fuente: elaboración propia con base en SPP (1983).

El siguiente paso es calcular la vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por el tipo de roca dominante con baja resistencia a la erosión fluvial por geosistema, la cual se hace a partir del análisis de geoprocesamiento de identidad, como el descrito en la variable de potencial de erosión de las unidades de terreno.

Tabla 6.5. Superficie del geosistema ocupado por tipos de roca dominantes.

Nombre del geosistema	Tipo de roca y superficie ocupada por tipo de geosistema (km ² y %) en el área de estudio							
	Aluvial		Arenisca		Basalto		Lutita-Arenisca	
	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)
Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	3.42	36.95			1.08	11.67	2.54	27.35
Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	7.44	32.24			2.83	12.26	12.66	54.86
Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	2.24	82.60		ND*		ND	0.47	17.40
Agricultura de temporal anual y semipermanente	12.50	70.31			0.67	3.79	4.52	25.41
Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	38.25	19.37	0.34	0.17	5.17	2.62	153.56	77.79
Pastizal cultivado e inducido	38.30	13.84			27.96	10.10	209.81	75.80
Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	8.59	11.72		ND	4.38	5.98	56.22	76.69
Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	7.57	4.64	0.14	0.08	20.79	12.74	133.96	82.06
Vegetación de galería	4.38	44.29		ND	0.26	2.67	4.48	45.38

*ND: no determinada a esta escala de trabajo.

Fuente: elaboración propia.

Para identificar qué tan vulnerable es cada tipo de geosistema considerando esta variable, éstos se clasifican según el área que ocupa la roca con menor grado de resistencia a la erosión fluvial que, en este caso, es la roca aluvial. Para ello, se establecieron los siguientes criterios (Tabla 6.6).

En la Tabla 6.7 se establece la categoría de vulnerabilidad según los criterios mencionados.

Con esta clasificación se genera un mapa de vulnerabilidad por tipo de geosistema en función de la superficie ocupada por sedimentos aluviales (menor resistencia a la erosión fluvial) (Figura 6.8).

Tabla 6.6. Vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por el tipo de roca dominante con muy baja resistencia a la erosión fluvial (sedimentos aluviales) por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de la superficie ocupada por el tipo de roca dominante menos resistente a la erosión fluvial, por tipo de geosistema
Muy baja	<20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

Tabla 6.7. Vulnerabilidad de los geosistemas en función de la superficie del geosistema ocupada por la roca con menor resistencia a la erosión fluvial (aluvial).

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de superficie ocupada por rocas con menor resistencia a la erosión fluvial	Categoría de vulnerabilidad
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	36.95	Baja
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	32.24	Baja

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de superficie ocupada por rocas con menor resistencia a la erosión fluvial	Categoría de vulnerabilidad
------	-------------	---	-----------------------------

Tabla 6.7. Continúa.

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de superficie ocupada por rocas con menor resistencia a la erosión fluvial	Categoría de vulnerabilidad
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	82.60	Muy alta
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	70.31	Alta
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	19.37	Muy baja
6	Pastizal cultivado e inducido	13.84	Muy baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	11.72	Muy baja
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	4.64	Muy baja
9	Vegetación de galería	44.29	Moderada

Fuente: elaboración propia.

A mayor superficie ocupada por el tipo de roca con menor resistencia a la erosión fluvial por tipo de geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca, debido a que hay un mayor potencial de pérdida de la integridad de la roca.

c) Morfometría

Para estimar el peso que aporta la morfometría en el cálculo de la vulnerabilidad en el área de estudio, se consideraron tres variables: densidad de disección, pendientes mayores a los 18° y densidad de caminos.

c.1 Densidad de disección. La densidad de disección puede asociarse fácilmente con los procesos erosivos en un área dada; valores altos indican fuertes e intensos procesos erosivos, ya sea porque las precipitaciones sean fuertes o agresivas, porque el material del sustrato o suelo sea muy susceptible a la erosión, o por ambos. Se considera que las manifestaciones de la erosión son representativas de efectos causados por agentes naturales, por ejemplo, las lluvias.

La presente sección propone definir en una primera etapa cuáles son las capas indispensables para estimar la vulnerabilidad en función de la densidad de disección, de qué tipo son y si se requiere hacer tratamientos previos a partir de una serie de capas primarias. Asimismo, se indican cuáles son los programas libres o módulos ejecutables que se requiere utilizar.

De manera común la densidad de disección se mide en cuadrantes, así es posible obtener los valores centrales de cada cuadrante para hacer una interpolación con la ayuda del programa ArcMap, Versión 10.2.2; sin embargo, el programa TLALOC (Parrot, 2006c) propone diferentes opciones tales como cálculo de la longitud de la red o estimación a partir del número de píxeles que dibujan la red fluvial, uso de cuadrantes (Figuras 6.9a y 6.9b) o uso de una ventana móvil (Figura 6.10).

El primer paso para la obtención de la capa de densidad de disección es tomar como base la capa de curvas de nivel vectoriales de la carta topográfica del Inegi, escala 1:50 000, para generar un MDE con la ayuda del programa DEMONIO (Parrot, 2012b) o diversos módulos ejecutables (Brod4_Mx, Miel4_Mx y New-Miel_V2). Estos programas permiten obtener un MDE de mayor precisión (tamaño del píxel de 10 m; escala hipsométrica en milímetros).

Para tal efecto se realizó una interpolación entre las curvas de nivel del INEGI (cada 20 m) y puntos de control (cada metro) usando como soporte la imagen satelital Digital Globe, con una resolución espacial de 30 cm, la cual está disponible en el portal de Google Earth.

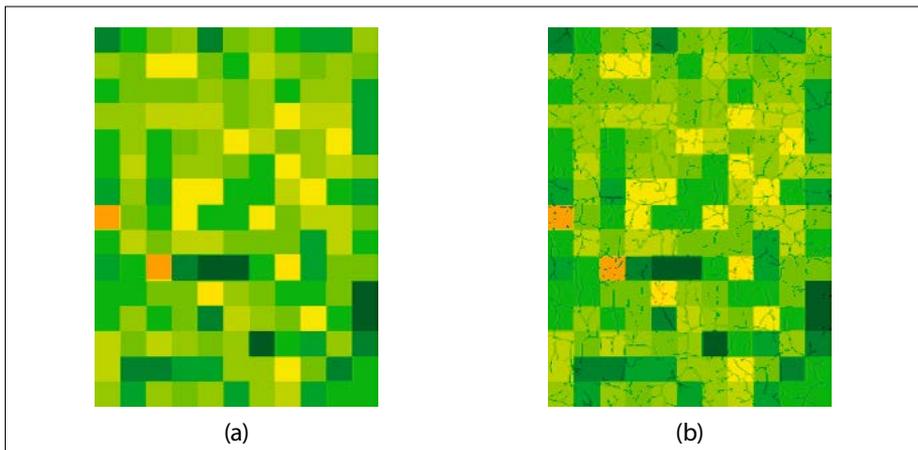


Figura 6.9. Densidad de disección. (a) Cuadrantes; (b) Superposición de la red de drenaje sobre los cuadrantes.

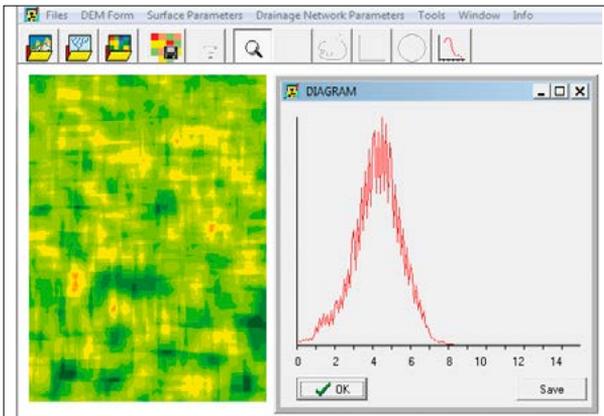


Figura 6.10. Cálculo de la densidad de disección con una ventana móvil e histograma. Fuente: Programa TLALOC (2006c).

A partir del MDE se pueden obtener otras capas, tales como pendiente, aspecto (dirección de la pendiente), red de drenaje, etcétera. En la Figura 6.11a se muestran las curvas de nivel sobre el mapa de los geosistemas y la Figura 6.11b corresponde al MDE sombreado.

Una vez generado el MDE se obtiene la red fluvial mediante el programa TLALOC (Parrot 2006a, 2006c). Cabe hacer mención que la red fluvial está incom-

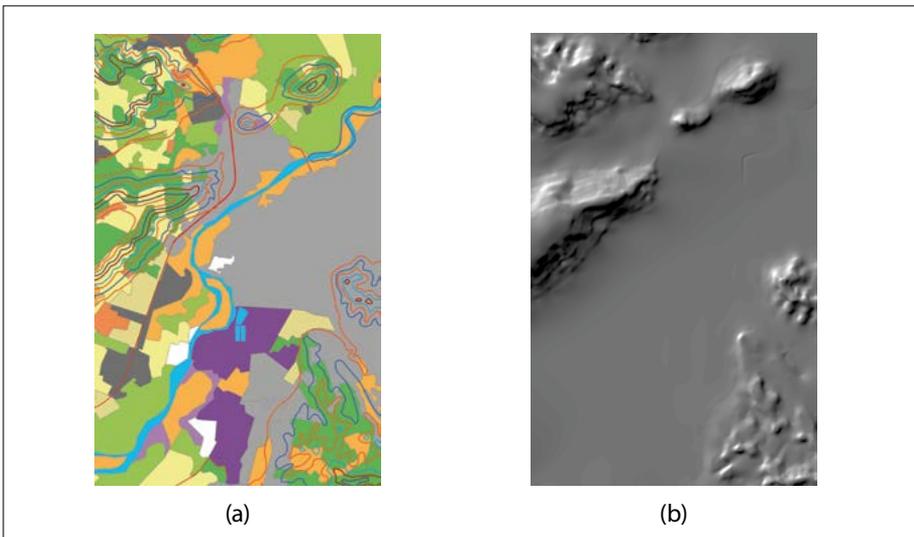


Figura 6.11. (a) Superposición de las curvas de nivel sobre la imagen de los geosistemas; (b) MDE sombreado. Fuente: Programa DEMONIO (Parrot, 2012b).

pleta porque el algoritmo no infiere valores que no aparecen en el MDE (Figura 6.12a), por lo que existen elementos (píxeles) aislados, que pueden ser parte o no de la red fluvial. En esta situación es necesario realizar una edición de limpieza y corrección de la capa geoespacial de tipo raster resultante.

Como muestra la Figura 6.12b, es posible sobreponer la red fluvial sobre una imagen del aspecto de la pendiente (función del programa TLALOC), lo que ayudará a realizar las correcciones necesarias utilizando un editor de pantalla como Paint Shop Pro o módulos ejecutables tales como Binar_V2 (Parrot, 2010) y Net_curve2 (Parrot, 2012e).

Con la capa geoespacial de la red fluvial obtenida se procede a generar la capa de densidad de disección en una ventana móvil de 1 km² (generalmente es el valor que se selecciona a escala de semidetalle: 1:50 000) (Lugo-Hubp, 2011), por medio del programa TLALOC, donde los valores de la variable obtenidos varían de 2.2 hasta 8.8 km/km² (que corresponden a las categorías de muy baja a muy alta densidad de disección) (Tabla 6.8) para una zona de observación en km², normalizado entre 0 y 255 tonos de grises (Figura 6.13).

Una vez generada la capa de densidad de disección, se requiere calcular la superficie ocupada por los valores altos y muy altos (>6.6 km/km²), por tipo de geosistema, con el objetivo de estimar la vulnerabilidad intrínseca, ya que los cortes más erosivos del paisaje se verán afectados en caso de derrame de crudo a partir de ductos (Tabla 6.8).

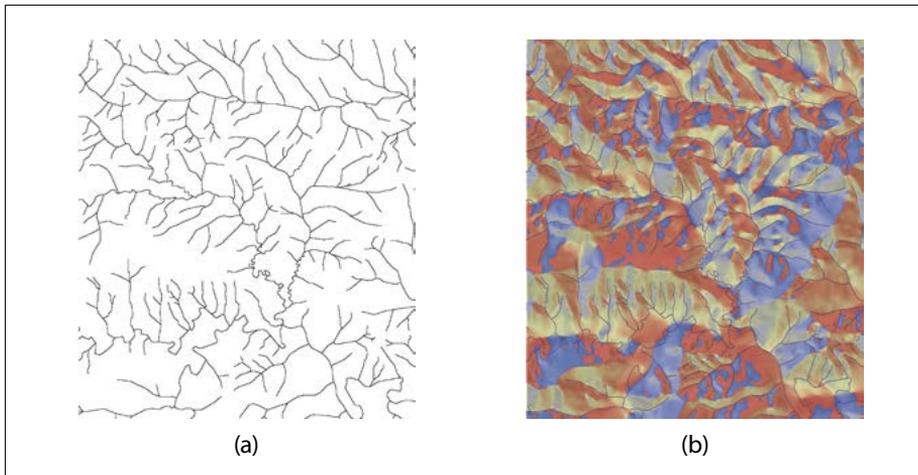


Figura 6.12. (a) Extracción automatizada de la red de drenaje (programa TLALOC, 2006c); (b) Sobreposición de la red fluvial corregida sobre la imagen del aspecto de la pendiente.

Tabla 6.8. Categorías de densidad de disección en el área de estudio.

Categorías de densidad de disección	Densidad de disección: longitud de cauces/unidad de superficie (km/km ²)*
Muy baja	<2.2
Baja	2.2 – 4.4
Moderada	4.4 – 6.6
Alta	6.6 – 8-8
Muy alta	>8.8

*Importante: los valores deberán ajustarse a la escala de la región estudiada. Los intervalos de esta tabla se calcularon considerando el valor máximo y mínimo registrado en la densidad de disección del ejemplo de estudio. Sin embargo, cabe mencionar que, para todo el país, los valores máximos y mínimos de la densidad de disección, calculados a escala 1:250 000, se encuentran en los intervalos >0.5 y <9 (Lugo-Hubp, Quesada y García-Arizaga, 1989).

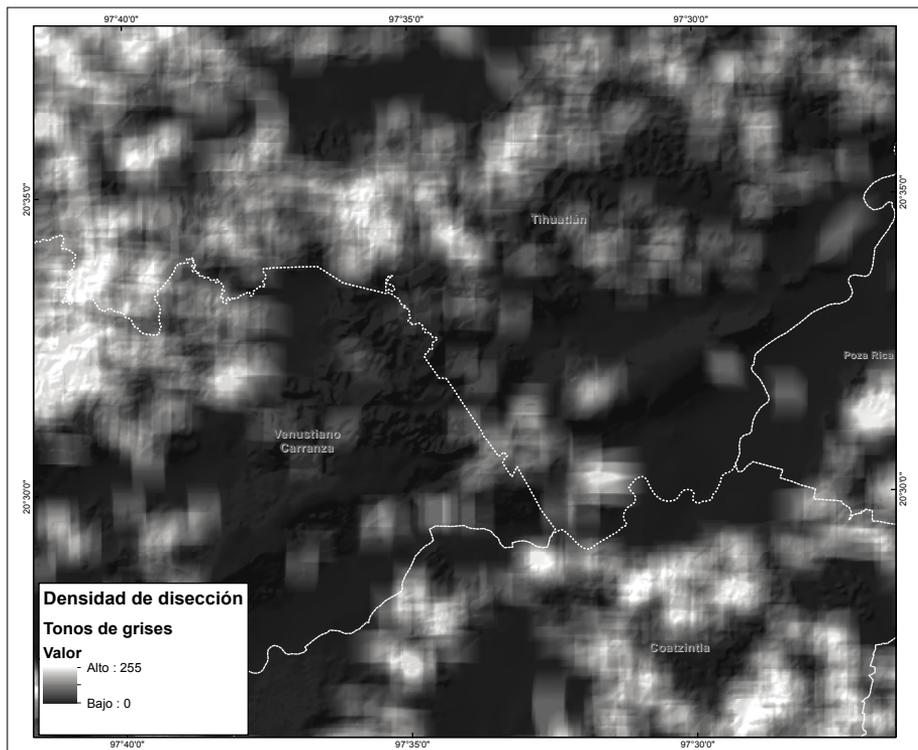


Figura 6.13. Densidad de disección en tonalidades de grises. Fuente: Programa TLALOC (Parrot, 2006c).

Para adquirir la capa de vulnerabilidad de los geosistemas considerando la densidad de disección, es necesario realizar un tratamiento previo. El programa GeoSys_Explor (Parrot, 2012c) analiza, en primer lugar, las características espaciales de los geosistemas tales como frecuencia de cada geosistema, superficie total y promedio, valor mínimo y máximo por superficie de cada geosistema y desviación estándar, entre otros, los cuales se reportan en una hoja de cálculo del programa de Excel.

Cada tratamiento de los archivos en este programa se representa como una imagen de tipo raster con extensión raw en relación con un archivo descriptivo con extensión .txt, donde se indican los números de líneas, de columnas y de bytes (en este caso, igual a 1, porque son imágenes de 255 tonos de gris), así como la dinámica (min. y max.) y el tamaño del píxel en metros (Figura 6.14).

Después se seleccionan los parámetros con los que se generará la capa de vulnerabilidad de los geosistemas con respecto a la densidad de disección. En este caso, se toman en cuenta los valores máximos (>8.8) y mínimos (2.2) de la capa de densidad de disección, es decir, se marca un umbral, que es específico para el área de estudio.

En este punto, para una mejor apreciación visual, es necesario transformar la capa de tonalidades de grises, resultado de la distribución espacial de la densidad de disección en el área de estudio. Para ello se requiere hacer una clasificación con

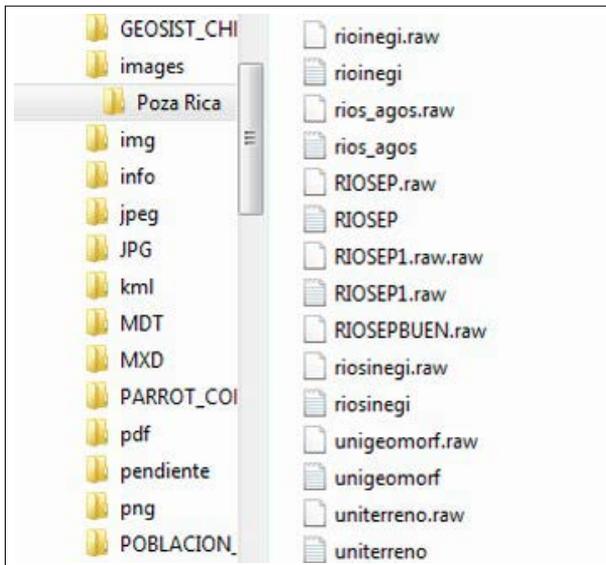


Figura 6.14. Configuración requerida para realizar el tratamiento. Fuente: Programa Geosys_Explor, Parrot (2012c).

los valores establecidos en la Tabla 6.8; es necesario dividir la capa en 5 categorías con la herramienta Classify (método manual) del programa ArcMap, Versión 10.2.2 (Figura 6.15).

El paso siguiente es realizar el geoprocésamiento de identidad entre las capas de densidad de disección y geosistemas para establecer la vulnerabilidad intrínseca a partir de los cortes erosivos del paisaje (Figura 6.16).

Por último se calculan las superficies en km² y en porcentaje, por tipo de geosistema (Tabla 6.9).

Con los resultados obtenidos se establecen las categorías de vulnerabilidad por tipo de geosistema, considerando las categorías de alta y muy alta densidad de disección (>6.6 km/km²), con los siguientes criterios (Tablas 6.10 y 6.11).

En la Tabla 6.11 se establece la categoría de vulnerabilidad según los criterios mencionados.

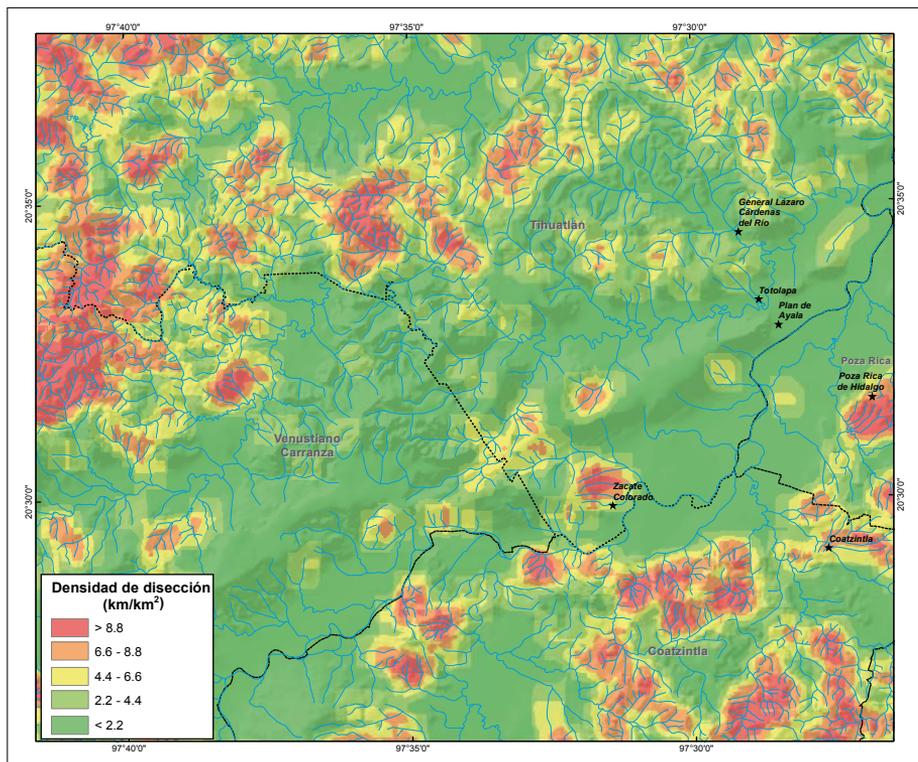


Figura 6.15. Densidad de disección en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

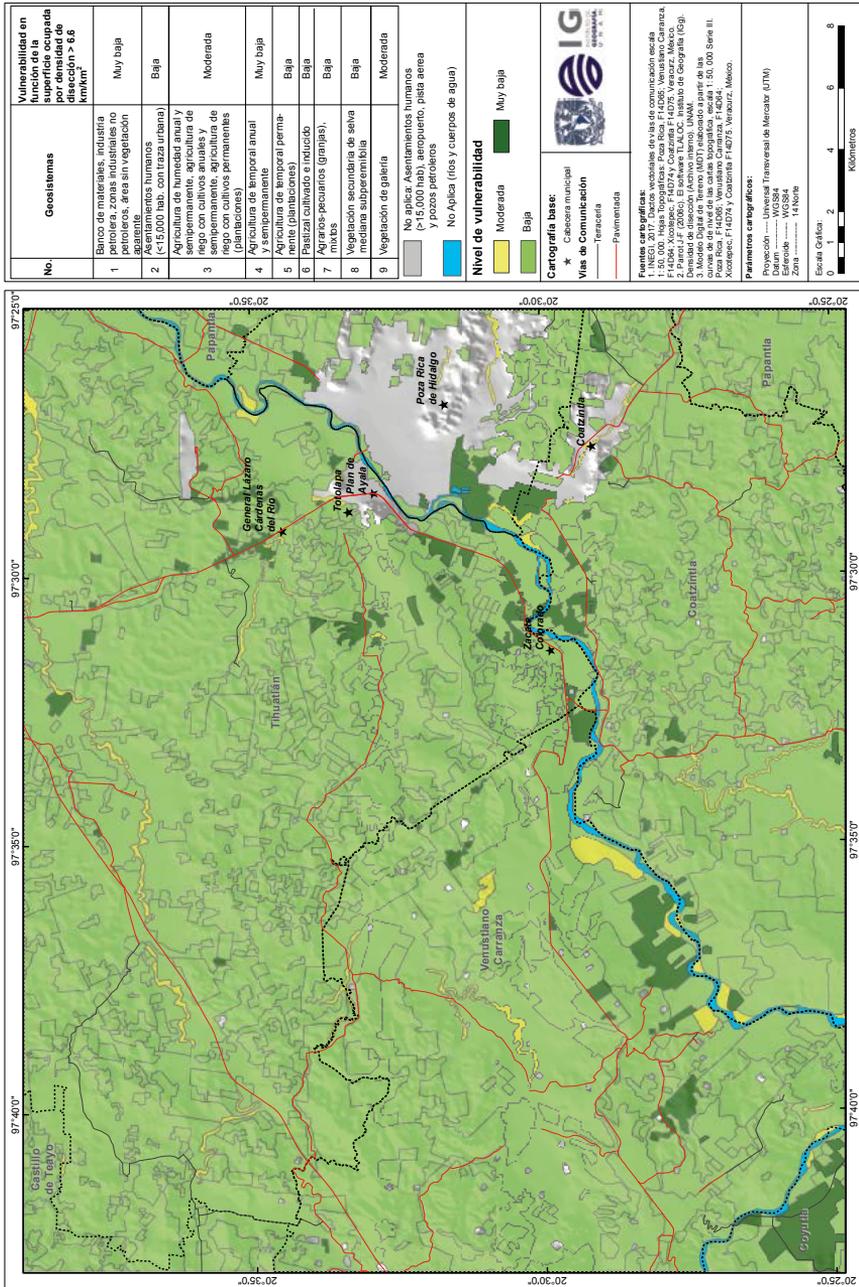


Figura 6.16. Vulnerabilidad en función de la densidad de cosechadas por tipo de geosistema. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.9. Superficie por tipo de geosistema ocupada por diferentes categorías de densidad de disección en el área de estudio.

Geosistema	Sup. total geosistema (km ²)	Densidad de disección km/km ²									
		Muy Baja (< 2.2)		Baja (2.2-4.4)		Moderada (4.4-6.6)		Alta (6.6-8.8)		Muy alta (>8.8)	
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	9.27	2.37	26	4.42	48	2.06	22	0.32	3	0.11	1
Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	23.07	0.87	4	6.88	30	9.54	41	4.38	19	1.41	6
Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	2.71	0.19	7	0.64	24	0.69	25	0.66	24	0.53	20
Agricultura de temporal anual y semipermanente	17.79	1.74	10	7.11	40	6.09	34	2.78	16	0.06	0
Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	197.41	4.41	2	49.32	25	83.40	42	48.64	25	11.64	6
Pastizal cultivado e inducido	276.24	16.36	6	77.02	28	107.15	39	61.00	22	14.72	5
Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	70.25	2.72	4	23.30	33	24.05	34	18.55	26	1.62	2
Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	163.25	13.49	8	52.20	32	62.72	38	28.58	18	6.27	4
Vegetación de galería	9.88	0.14	1	1.73	18	3.34	34	3.16	32	1.52	15

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.10. Vulnerabilidad en función de la densidad de disección por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de la superficie ocupada por áreas con la máxima densidad de disección, por tipo de geosistema (>6.6 km/km ²)
Muy baja	< 20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.11. Superficie ocupada por geosistemas con densidad de disección >6 km/km².

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de superficie ocupada por densidad de disección >6.6 km/km ² por tipo de geosistema	Categoría de vulnerabilidad
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	5	Muy baja
2	Asentamientos humanos (<15,000 habitantes, con traza urbana)	25	Baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	44	Moderada
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	16	Muy baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	31	Baja
6	Pastizal cultivado e inducido	27	Baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	29	Baja
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	21	Baja
9	Vegetación de galería	47	Moderada

Fuente: elaboración propia.

A mayor superficie ocupada por una alta densidad de disección por tipo de geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca, debido a que hay un mayor potencial de pérdida de materiales por procesos de intemperismo y erosión.

c.2 Dominancia y ubicación de pendientes mayores a 18°. La capa con la información de las pendientes surge también del MDE; los grados de la pendiente corresponden a atributos primarios que se calculan directamente a partir de la superficie de este modelo digital (Wilson y Gallant, 2000). Esta capa se genera mediante el uso del programa ArcMap, Versión 10.2.2, a partir de la herramienta Spatial Analyst/Surfaceanalysis/slope, la cual, por defecto, genera nueve clases de pendiente con base en el valor mínimo y máximo, por lo que varían según la zona de estudio.

Asimismo, el programa TLALOC (Parrot, 2006a; 2006c) provee una herramienta similar llamada slope, en la que, al igual que en ArcMap, Versión 10.2.2, la capa de pendiente está simbolizada por colores, es decir, cada uno de ellos constituye un nivel o rango de la pendiente en formato raster (Figura 6.17a). De hecho, esta capa no puede utilizarse directamente, ya que este resultado es únicamente para dar una vista cromática a la variable, por lo que se necesita una conversión a una escala en tono de grises para poder trabajar con las imágenes; en este caso, la escala de la pendiente en esta tonalidad va de 0 a 90 (Figura 6.17b).

Una vez generada la capa de la pendiente, el paso siguiente es hacer una reclasificación de los valores que se dan por defecto, ajustándola a sólo dos clases: pendiente mayor y pendiente igual o menor a 18° (Figura 6.18).

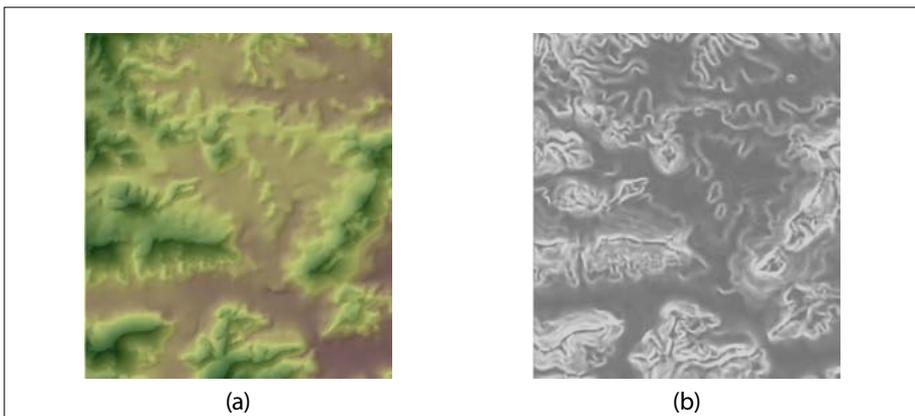


Figura 6.17. (a) Pendiente simbolizada por colores; (b) Pendiente en escala de 0 a 90 tonos de grises. Fuente. Programa TLALOC (Parrot, 2006c).

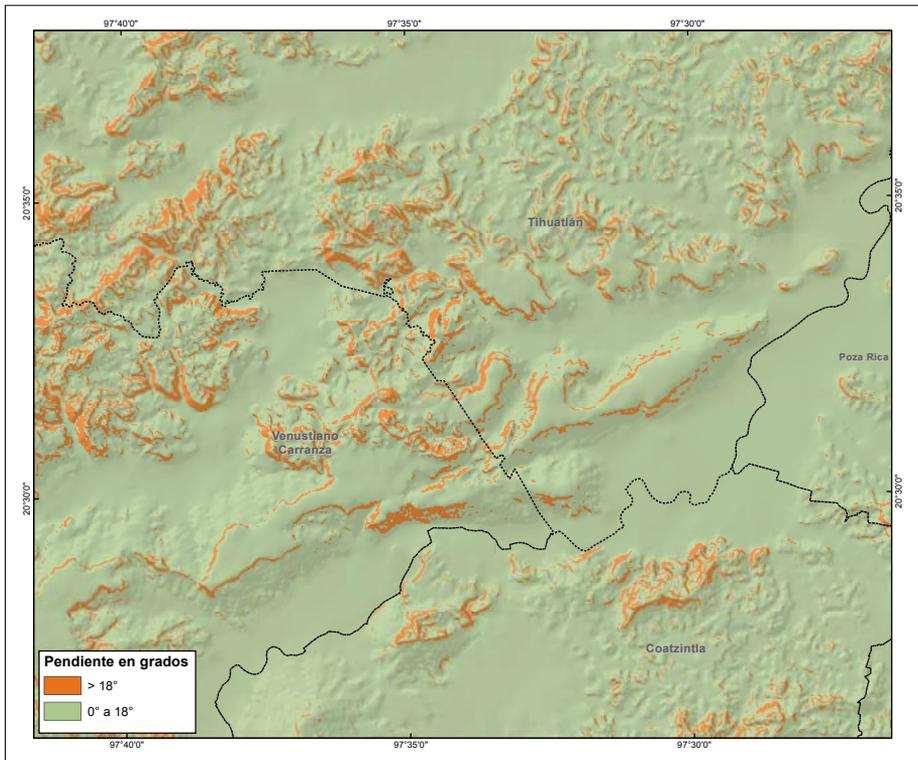


Figura 6.18. Pendiente menor y mayor a 18°. Fuente: elaboración propia.

El paso siguiente es extraer todos los valores correspondientes a la pendiente mayor a 18° (Figura 6.19).

Se procede a realizar el geoprocésamiento de identidad entre las capas de pendiente y geosistemas. Por último, se calculan las superficies en km² y los porcentajes ocupados, por tipo de geosistema, con una pendiente mayor a 18°. Se establecen las categorías de vulnerabilidad por tipo de geosistema (Tablas 6.12 y 6.13; Figura 6.20).

A mayor superficie ocupada por pendientes mayores a 18° por tipo de geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca, debido a que hay un mayor potencial de pérdida de materiales por fenómenos gravitacionales y por procesos de intemperismo y erosión.

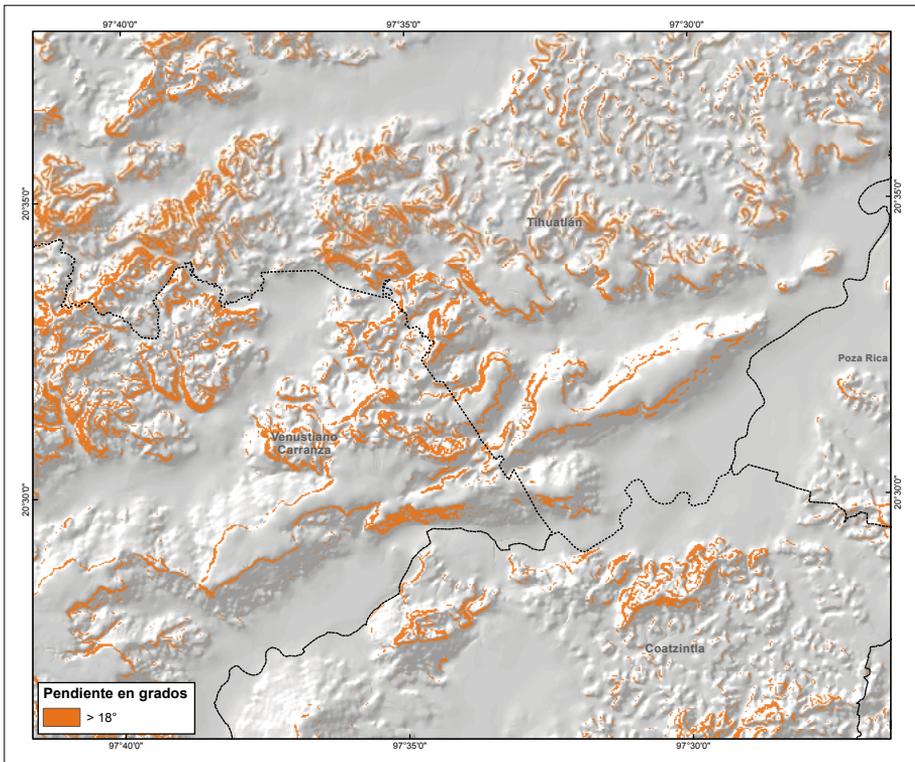


Figura 6.19. Pendiente mayor a 18°. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.12. Vulnerabilidad en función de la dominancia de las pendientes mayores a 18°, por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de la superficie ocupada por pendientes >18°, por tipo de geosistema
Muy baja	<20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.13. Vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por pendientes mayores a 18°, por tipo de geosistema.

Núm.	Geosistemas	Superficie ocupada por pendientes mayores a 18°, por tipo de geosistema		Categoría de vulnerabilidad
		km ²	(%)	
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	0.09	97	Muy Baja
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitante, con traza urbana)	0.29	1	Muy Baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0.14	5	Muy Baja
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	0.33	2	Muy Baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	11.97	6	Muy Baja
6	Pastizal cultivado e inducido	20.59	7	Muy Baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	29.41	42	Moderada
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	28.10	17	Muy baja
9	Vegetación de galería	0.15	2	Muy Baja

Fuente: elaboración propia.

c.3 Densidad de cabeceras. En esta guía se considera la densidad de cabeceras como la relación porcentual del área que ocupan las cabeceras con respecto al área total, por tipo de geosistema.

Al tener la red de drenaje perfectamente dibujada (limpieza previa) (véase Sección Densidad de disección del relieve del Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad), se puede calcular la densidad de cabeceras den-

tro de una ventana móvil.¹⁶ El programa TLALOC emplea dos escalas de salida: 0-100 o 0-255 (Figuras 6.21a y 6.21b). La primera corresponde a una escala en porcentaje y la segunda a una escala “visual”.

Para una mejor apreciación de la capa de densidad de cabeceras, se recomienda sobreponerla al MDE, en el que el valor mínimo es 0 km²/km² y el máximo es 1 km²/km², que es específico para el área de estudio (Tabla 6.14), o en porcentaje: 0% es el mínimo, y 100%, el máximo.

Se procede a realizar el geoprocesamiento de identidad entre las capas de densidad de cabeceras y geosistemas. Por último, se calculan las superficies en km² y en porcentaje de los geosistemas que se encuentran en la categoría alta y más alta de densidad de cabeceras (Tabla 6.14), y se establece la categoría de vulnerabilidad por geosistema con los criterios mencionados (Tablas 6.15 y 6.16; Figura 6.22).

A mayor superficie ocupada por una mayor densidad de cabeceras por tipo de geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca, debido a que hay un mayor potencial de pérdida de materiales por procesos de intemperismo y erosión.

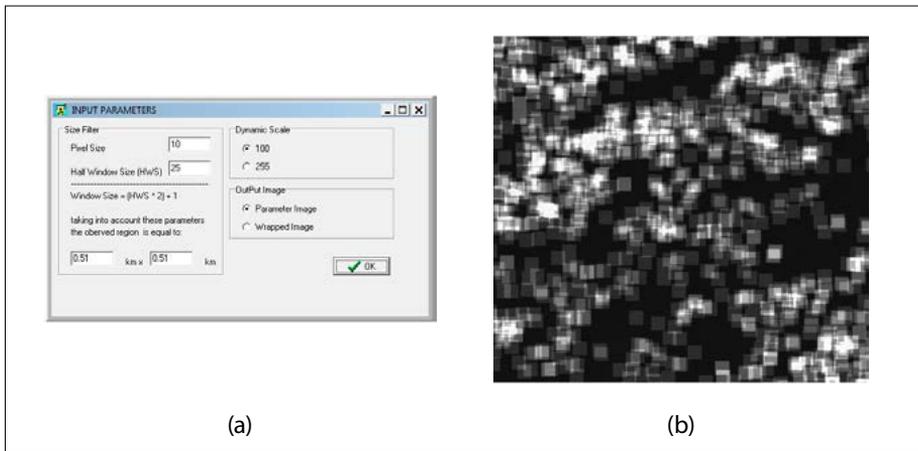


Figura 6.21. (a) Definición de los parámetros en el programa TLALOC para el cálculo de la densidad de cabeceras; (b) Densidad de cabeceras en tonalidades grises en el área de estudio. Fuente: Programa TLALOC (Parrot, 2006c).

¹⁶ Se utiliza una ventana móvil porque su origen es a partir del MDT, en el que se pueden crear capas de densidad de disección, red fluvial, densidad de cabeceras, balance hídrico y orientación, entre otros. Para calcular densidades, se requiere hacer un mallado, el cual es estático; la ventana móvil permite hacer un escaneo de todo el mallado (véase Sección C.1 de este capítulo).

Tabla 6.14. Superficie por tipo de geosistema ocupada por diferentes categorías de densidad de cabeceras en el área de estudio.

Geosistema	Densidad de cabeceras km ² /km ²									
	Muy baja (0-0.29)		Baja (0.30-0.52)		Moderada (0.53-0.72)		Alta (0.73-0.89)		Muy alta (0.90-1)	
	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)
Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	2.20	23.73	0.33	3.55	---	---	---	---	---	---
Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	6.48	20.08	1.93	8.36	1.20	5.20	---	---	---	---
Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0.27	9.96	0.83	30.62	---	---	---	---	---	---
Agricultura de temporal anual y semipermanente	2.93	16.46	1.88	10.56	0.60	3.37	---	---	---	---
Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	19.24	9.74	14.93	7.56	31.67	16.04	25.46	12.89	15.99	8.09
Pastizal cultivado e inducido	30.04	10.87	36.69	13.28	39.84	14.42	31.26	11.31	15.00	5.43
Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	10.20	14.51	9.60	13.66	14.52	20.52	3.86	5.49	3.63	5.16
Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	40.41	24.75	35.72	21.88	23.45	14.36	10.12	6.19	1.88	1.15
Vegetación de galería	2.40	24.29	---	---	---	---	---	---	---	---

*(--): no detectado a la escala de medición. Las categorías se establecen de acuerdo con los valores máximos y mínimos de la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.15. Superficie ocupada por una densidad de cabeceras mayor a 0.72 km²/km².

Núm.	Geosistema	Superficie de geosistema con densidad máxima de cabeceras (>0.72km ² /km ²)*		Categoría vulnerabilidad
		km ²	(%)	
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	0	0	Muy baja
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	0	0	Muy baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0	0	Muy baja
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	0	0	Muy baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	41.45	20.98	Baja
6	Pastizal cultivado e inducido	46.26	16.74	Muy baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	7.49	10.65	Muy baja
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	12	7.34	Muy baja
9	Vegetación de galería	0	0	Muy baja

* Valor específico para la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.16. Vulnerabilidad en función de la densidad de cabeceras.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de la superficie ocupada por una mayor densidad de cabeceras (>0.72 km ² /km ²)*, por tipo de geosistema
Muy baja	<20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

* Valor específico para la zona de estudio.

d. Morfografía

d.1 *Forma y configuración de la ladera.* Como se mencionó en el Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad, entre más escarpada y de contorno convergente sea la ladera, mayor será la concentración de materia y energía; es más susceptible a los procesos de erosión. Por el contrario, las laderas divergentes separan, difunden y esparcen dicha energía. Según este criterio, en este estudio sólo se considera el análisis por laderas convergentes.

La capa de información de laderas convergentes también se genera a partir del MDE. Con el uso de la herramienta Convexity del programa TLALOC, se genera un raster en tono de grises normalizado de 0 a 255, que muestra las zonas de erosión del lugar, así como las zonas planas (Figura 6.23).

Como en el caso de las cabeceras, es necesario hacer una reclasificación de la capa de laderas convergentes en el MDE para tener una mejor apreciación e identi-

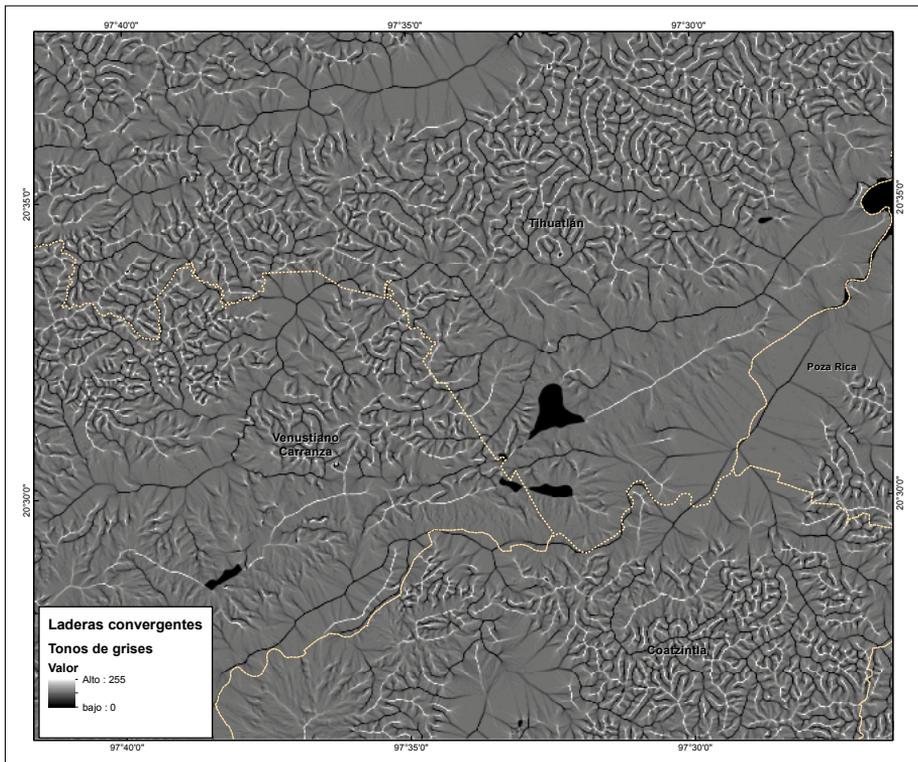


Figura 6.23. Capa de información de laderas convergentes, normalizada de 0 a 255 tonos de grises. Fuente: Programa TLALOC (Parrot, 2006c).

ficación de las zonas con erosión y de las zonas planas. Para dicha reclasificación, se hace el cálculo con base en la escala de grises de 0 a 255, donde los tonos 1 a 8 se consideran zona plana, de 8 a 55 se refieren a las laderas divergentes, y los comprendidos entre 50 y 255, a las laderas convergentes. Los tonos 50 a 55 se sobreponen, ya que ahí está el punto de inflexión. La reclasificación se hará con el uso de la herramienta SpatialAnalyst/Reclassify del programa ArcMap, Versión 10.2.2 (Figura 6.24). Los parámetros que se establecen en este cálculo dependerán del área de estudio (Tabla 6.17).

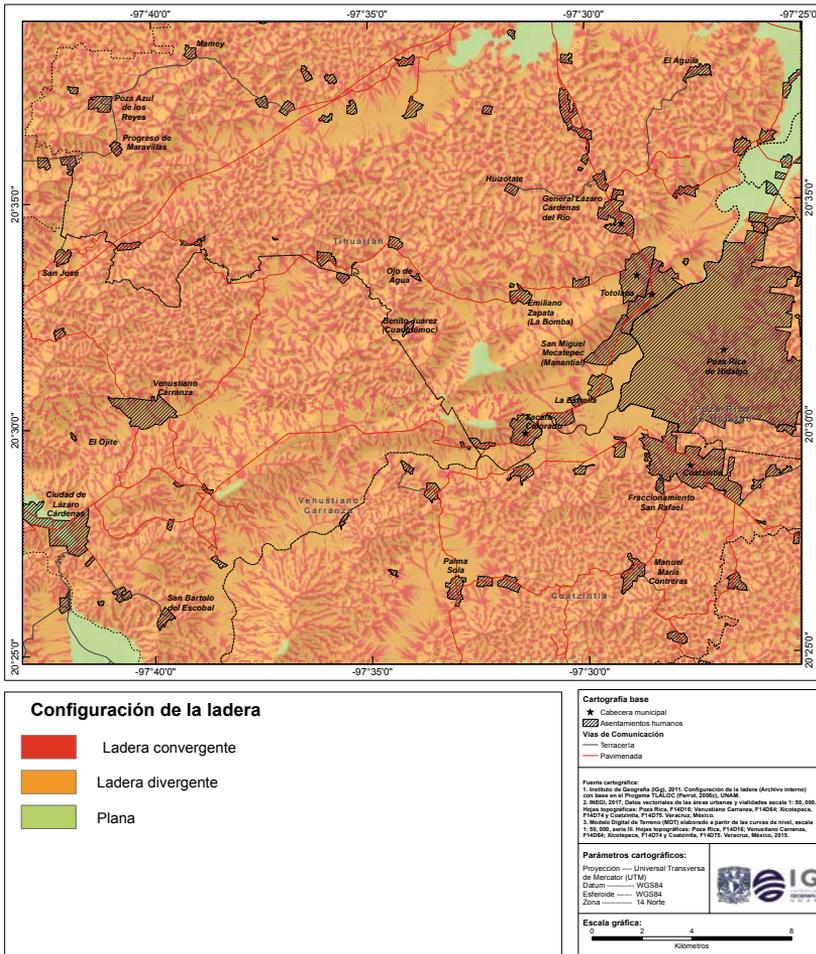


Figura 6.24. Clasificación de la ladera. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.17. Superficie ocupada por laderas convergentes, divergentes y zonas planas.

Núm.	Geosistemas	Laderas convergentes	Laderas divergentes	Zona plana
		km ²	km ²	km ²
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	2.25	6.93	0.09
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	6.72	14.62	1.73
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0.84	1.63	0.23
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	4.06	11.65	2.08
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	69.80	119.02	8.58
6	Pastizal cultivado e inducido	102.50	164.64	9.10
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	24.93	44.19	1.12
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	62.75	99.62	0.88
9	Vegetación de galería	1.88	7.25	0.75

Fuente: elaboración propia.

Una vez que se ha generado la capa de laderas, se requiere seleccionar sólo los geosistemas que se encuentran en laderas convergentes para iniciar con el análisis de geoprosamiento de identidad y así calcular las superficies en km² y porcentajes por tipo de geosistema vulnerable (Figura 6.25).

Con el porcentaje de la superficie ocupada por laderas convergentes en los diferentes geosistemas se establece la categoría de vulnerabilidad según los criterios dados (Tablas 6.18 y 6.19).

A mayor superficie ocupada por una mayor superficie de laderas convergentes, por tipo de geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca, debido a que hay un mayor potencial de pérdida de materiales por procesos de intemperismo y erosión.

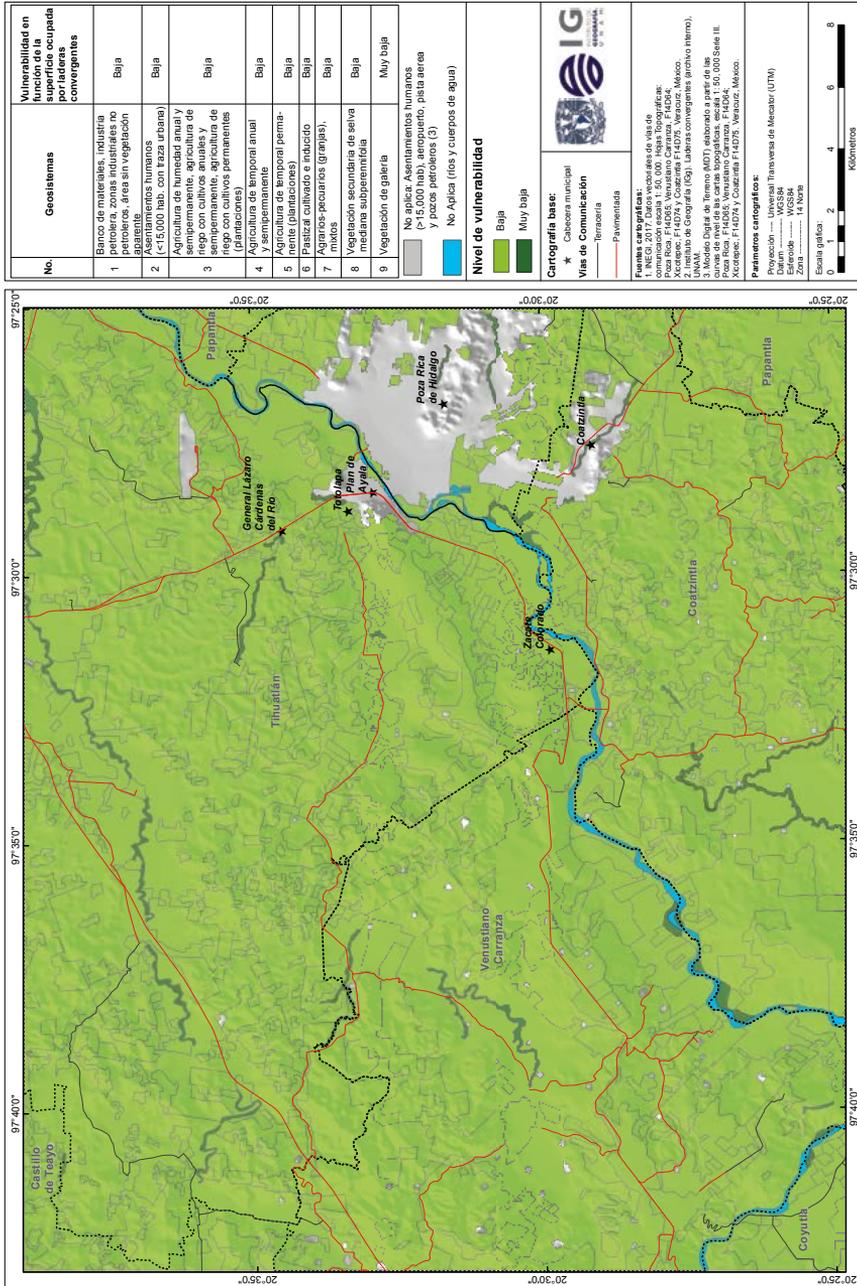


Figura 6.25. Vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por laderas convergentes, por tipo de geosistema. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.18. Vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por laderas convergentes, por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de superficie ocupada por laderas convergentes, por tipo de geosistema
Muy baja	<20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

Tabla 6.19. Vulnerabilidad por tipo de geosistema en función de la superficie ocupada por laderas convergentes.

Núm.	Geosistemas	Laderas convergentes por tipo de geosistema		Categoría de vulnerabilidad
		km ²	Porcentaje de superficie	
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras y área sin vegetación aparente	2.25	24.29	Baja
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	6.72	29.13	Baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones) y agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente	0.84	31.17	Baja
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	4.06	22.82	Baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	69.80	35.36	Baja
6	Pastizal cultivado e inducido	102.50	37.11	Baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas) y mixtos	24.87	35.41	Baja
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	62.75	38.44	Baja
9	Vegetación de galería	1.88	19.07	Muy baja

Fuente: elaboración propia.

Componente biótico

El componente biótico comprende la estimación de la vulnerabilidad en función del Índice de Vegetación Normalizado y de la Concentración de la vegetación activa, que se describen más adelante (Véase Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad/Vulnerabilidad intrínseca/Medio Biofísico/Componente biótico)

a) Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)

Sus valores están comprendidos entre -1 y $+1$, donde los valores negativos indican superficies sin vegetación (tales como cuerpos de agua, nieve o nubes), y los valores positivos, presencia de vegetación. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$NDVI(i,j) = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde: (i, j) son las coordenadas del píxel en estudio

R : rojo visible

NIR : infrarrojo cercano

Para este cálculo se tomó como base una imagen satelital SPOT, 2011, de 4 bandas espectrales, con una resolución espacial de 10 m. En la Figura 6.26 las tonalidades de color rojo representan la vegetación, ya sea secundaria, zonas de agricultura o pastizales; los tonos de color turquesa resaltan zonas urbanas, vialidades y algunas instalaciones petroleras, y el color oscuro representa los cuerpos de agua.

A partir de la banda 3 del rojo visible (R) y la banda 4, que es el infrarrojo cercano (NIR) de la imagen SPOT, se obtiene la capa del NDVI con el software libre Indices_V2 (Parrot, 2006b). Estos valores van de -1 hasta $+1$, donde los valores positivos representan la actividad fotosintética de la vegetación, y se normaliza entre 0 y 255 en tonos de grises con el objetivo de realzar superficie de vegetación en función de la respuesta espectral que se presenta en el infrarrojo cercano y atenuar otro tipo de superficies tales como suelo desnudo, cuerpos de agua, zonas urbanas, vegetación seca, etcétera.

La vegetación muy vigorosa corresponde a valores superiores a 0.25, lo que equivale a valores mayores a 158 en tonos de grises; la vigorosa, por su parte, corresponde a valores mayores a 0.13 (>140 en tonos de grises), como se muestra en la Tabla 6.20 y en la Figura 6.27.

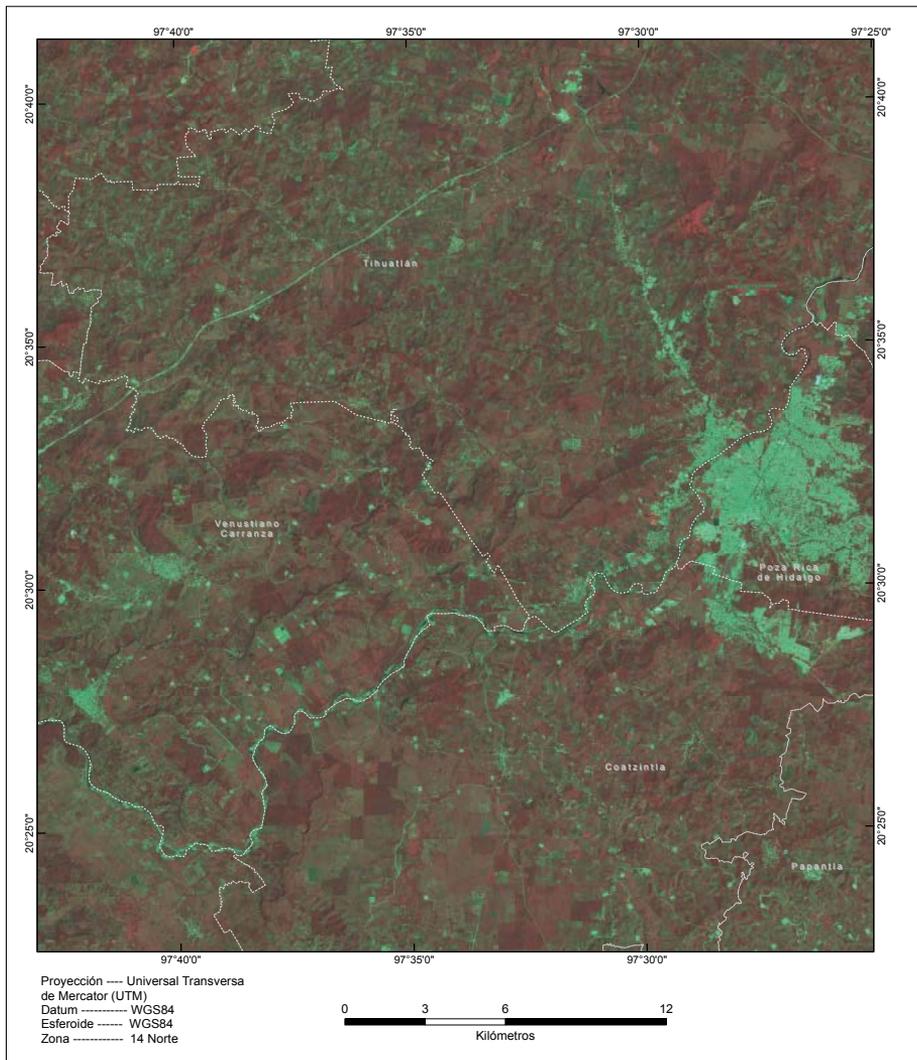


Figura 6.26. Imagen SPOT multispectral. Fuente: SPOT (2011).

Entre mayor superficie ocupada por vegetación activa (muy vigorosa y vigorosa), por tipo de geosistema, mayor será su vulnerabilidad en caso de derrame de crudo a partir de ductos. Dado lo anterior, se hace una reclasificación de los valores establecidos (Tabla 6.20) en sólo dos clases para agrupar las zonas con y sin vegetación, con la herramienta Spatial Analyst/Reclassify del programa

Tabla 6.20. Valores del NDVI.

Categoría de vegetación en función del NDVI	Valores del NDVI	
	Normalizado -1 a +1	Normalizado en tonos de grises 0 a 255
Vegetación muy vigorosa	0.25 a 1	158 a 255
Vegetación vigorosa	0.13 a 0.24	140 a 157
Vegetación poco vigorosa	0.12 a 0.01	101 a 156
Muy poca vegetación o sin vegetación (zonas urbanas, ríos, vialidades, cuerpos de agua, instalaciones petroleras)	0.00 a -1	0 a 100

Fuente: elaboración propia con base en el Programa Indices_V2 (Parrot, 2006b)

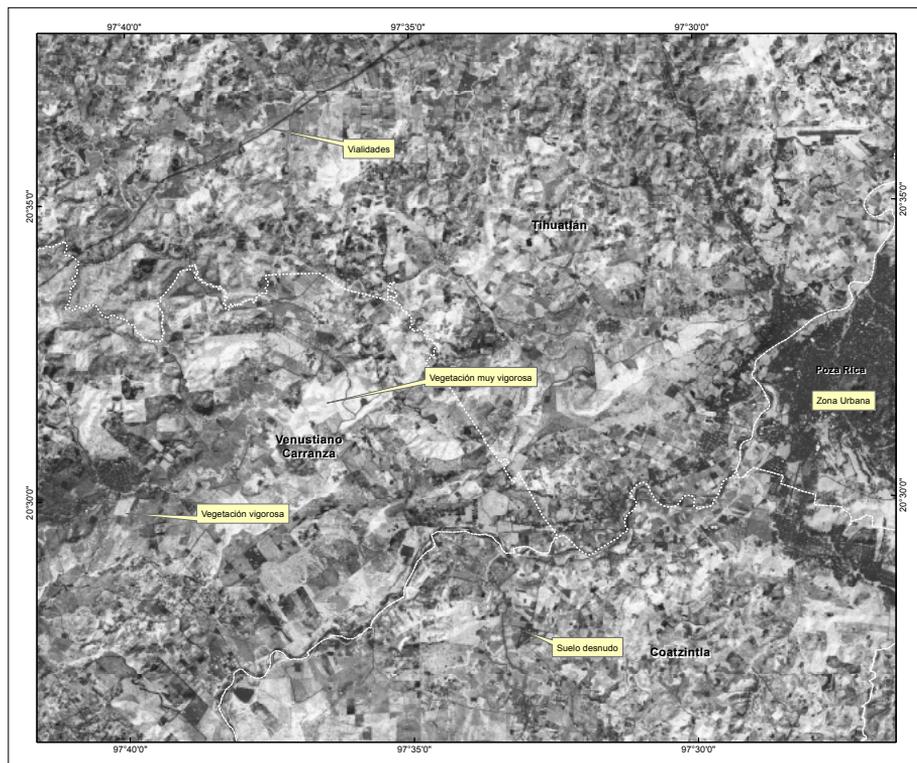


Figura 6.27. Imagen del NDVI. Fuente: El programa Indices_V2 (Parrot, 2006b).

Arc Map 10.2.2, donde el valor 1 representa la vegetación poco vigorosa y sin vegetación, y el valor 2, la vegetación muy vigorosa y vigorosa (Figura 6.28).

Posteriormente se realiza el análisis de geoprocesamiento de identidad considerando únicamente los geosistemas que se encuentran en la clase con valor 2, se calculan las superficies en km² por tipo de geosistema, y se establece su categoría de vulnerabilidad con los criterios mencionados (Tablas 6.21 y 6.22; Figura 6.29).

Finalmente se elabora un mapa con las categorías de vulnerabilidad por tipo de geosistema.

Entre mayor superficie ocupada por vegetación activa con un NDVI alto por tipo de geosistema, mayor será su vulnerabilidad intrínseca, dado que hay un mayor grado de integridad del sistema. Es decir, mientras más conservada se encuentre la vegetación natural, por tipo de geosistema, mayor será su vulnerabilidad, dado que hay una mayor efectividad de operación de los procesos naturales y mayor producción de bienes y servicios ambientales, los cuales se desea proteger. En agrosistemas ocurre lo mismo: si hay presencia de plantas cultivadas, el NDVI será alto y, por lo tanto, la vulnerabilidad será mayor.

b) Concentración de la vegetación activa

Para obtener la capa de densidad de vegetación activa, al igual que para el NDVI se emplean varios datos de teledetección con diferentes resoluciones, tales como:

- Sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), que se encuentra a bordo de los satélites de órbitas polares de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y tiene un tamaño de píxel de 1 km x 1 km.
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que dispone de una resolución espacial de 250 m y genera imágenes que muestran la variación espacial y temporal de la vegetación.
- Sensor Landsat Thematic Mapper (TM), con una resolución espacial de 30 m, la cual se aplica en estudios de vegetación a nivel local.
- El sensor más preciso para medir la cubierta vegetal es el llamado Vegetation, del satélite SPOT, que produce imágenes de 20 m x 20 m de resolución en modo multispectral (3 bandas) o a 10 m x 10 m en modo pancromático (una sola banda, equivalente a fotografía en blanco y negro).

Para este estudio se tomó como base la imagen SPOT multispectral (2011) con una resolución espacial de 10 m.

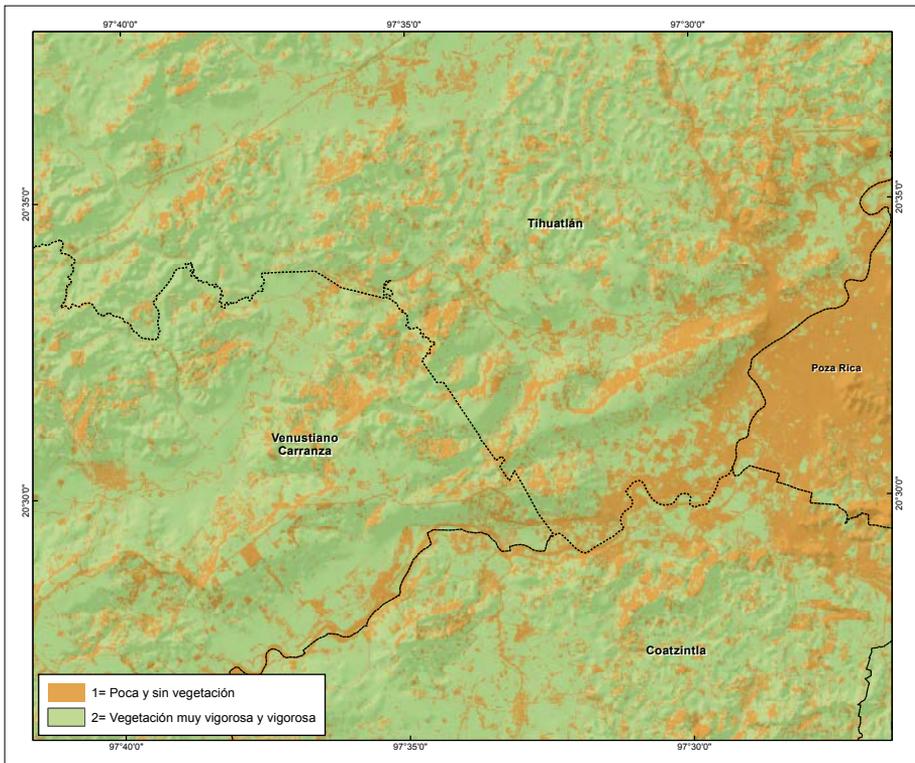


Figura 6.28. Reclasificación del NDVI. Fuente: elaboración propia con base en la imagen del NDVI.

Tabla 6.21. Vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por vegetación vigorosa y muy vigorosa, por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de superficie ocupada por vegetación vigorosa y muy vigorosa, por tipo de geosistema
Muy baja	<20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

Tabla 6.22. Superficie ocupada por vegetación vigorosa y muy vigorosa en función del NDVI, por tipo de geosistema.

Núm.	Geosistemas	Superficie que presenta altos valores de NDVI*		Vulnerabilidad del geosistema
		km ²	(%)	
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	1.83	19	Muy Baja
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	6.68	29	Baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	1.86	69	Alta
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	10.13	57	Moderada
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	134.62	68	Alta
6	Pastizal cultivado e inducido	198.34	72	Alta
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	70.16	100	Muy alta
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	155.23	95	Muy alta
9	Vegetación de galería	8.66	88	Muy alta

*Valores reclasificados a partir del NDVI: vegetación muy vigorosa y vigorosa (normalizado de 0.13 a 1 o de 140 a 255 en tonos de grises).

Fuente: elaboración propia.

Con el programa Density_V2 (Parrot, 2011) se calcula la concentración por medio de un patrón (Figura 6.30) que genera una imagen, en la cual están representados los porcentajes que van de 0 a 100. Para determinar los niveles de vulnerabilidad es necesario definir un valor umbral entre el mínimo y el máximo,

es decir, normalizar en tonalidades de grises de 0 a 255. En este caso, la concentración de vegetación muy alta corresponde a los valores entre 90 y 255 en tonalidades de gris. Los valores del umbral pueden variar según el área de estudio.

En la Figura 6.30 se observa una representación gráfica del área de estudio, en la cual cada cuadro ocupado por la vegetación constituye 4% (es decir, 1/25) de la superficie total ocupada por vegetación.

En el programa Density_V2 (Parrot, 2011) se agrega la imagen previa del NDVI, y en la ventana de propiedades de la imagen se añaden los parámetros que representan la mayor concentración de vegetación. El umbral mínimo será 90 y el valor de umbral máximo, de 255 en tonalidades de grises (Figura 6.31).

Mediante el geoprocesamiento de identidad, la capa de geosistemas se cruza con la capa de concentración de la vegetación activa. Para cada tipo de geosistema

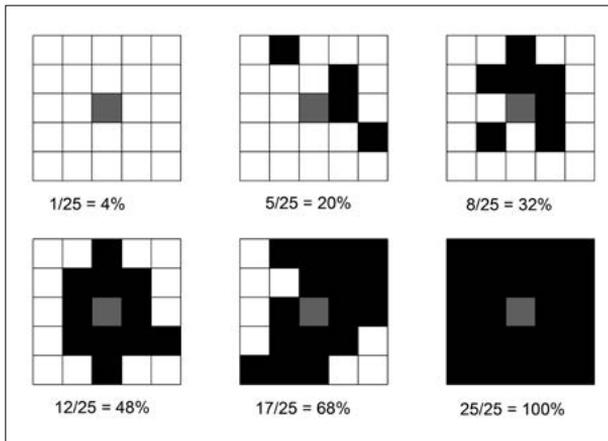


Figura 6.30. Patrón utilizado para el cálculo de la concentración de vegetación activa. Fuente: Programa Density_V2 (Parrot, 2011).

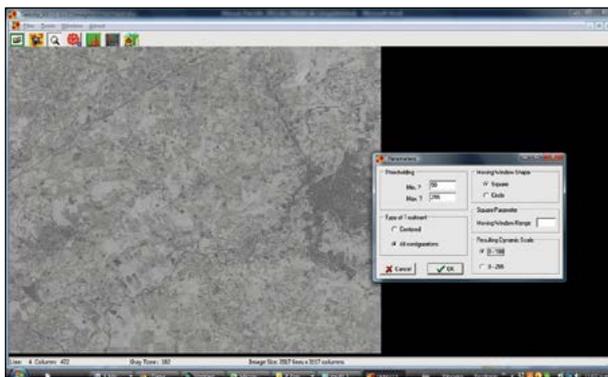


Figura 6.31. Cálculo de la concentración de vegetación. Fuente: Programa Density_V2 (Parrot, 2011).

se calcula (en km² y en porcentaje) el área ocupada por el índice de vegetación activa >90; posteriormente, se le asigna una de las cinco categorías de vulnerabilidad de acuerdo con las Tablas 6.23 y 6.24.

Tabla 6.23. Vulnerabilidad en función de la concentración de la vegetación.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de superficie con mayor concentración de vegetación activa* por tipo de geosistema
Muy baja	< 20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

*El valor del umbral requerido para el cálculo de la concentración de la vegetación activa es 90 (de 90 a 255 en tonalidades de grises).

Tabla 6.24. Superficie y porcentaje de geosistema en función de la concentración de la vegetación.

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de cobertura de concentración de la vegetación (umbral 90 a 255 en tonos de grises)		Vulnerabilidad en función de la concentración de la vegetación
		km ²	(%)	
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	0.12	1	Muy baja
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	0.37	2	Muy baja
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0.89	33	Baja

Tabla 6.24. Continúa.

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de cobertura de concentración de la vegetación (umbral 90 a 255 en tonos de grises)		Vulnerabilidad en función de la concentración de la vegetación
		km ²	(%)	
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	1.57	9	Muy baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	24.51	12	Muy baja
6	Pastizal cultivado e inducido	44.72	16	Muy baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	11.46	16	Muy baja
Núm.	Geosistemas	Porcentaje de cobertura de concentración de la vegetación (umbral 90 a 255 en tonos de grises)		Vulnerabilidad en función de la concentración de la vegetación
		km ²	(%)	
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	106.63	65	Alta
9	Vegetación de galería	1.63	16	Muy baja

*Umbral: 90 a 255 en tonos de grises.

Fuente: elaboración propia.

Una vez establecida la categoría de vulnerabilidad en función de la concentración de la vegetación por tipo de geosistema, se procede a elaborar el mapa de vulnerabilidad (Figura 6.32).

Es importante la verificación en campo, ya que ésta permite relacionar o validar los datos obtenidos por teledetección para las diferentes clases de vegetación.

En este sentido, a mayor concentración de vegetación activa por geosistema, mayor vulnerabilidad intrínseca, dado que hay una mayor efectividad de opera-

ción de los procesos naturales y producción de bienes y servicios ambientales, los cuales se desea proteger.

Componente antrópico

Comprende la estimación de la vulnerabilidad en función de la densidad de caminos y de la fragmentación de la vegetación (Véase Capítulo Descripción de variables e indicadores de vulnerabilidad/Vulnerabilidad intrínseca/Medio Biofísico/Componente antrópico)

a) Densidad de caminos

Para la obtención de la capa de densidad de caminos se parte de la capa vectorial de carreteras del INEGI, escala 1:50 000, la cual fue actualizada con base en una imagen satelital SPOT (2011), con 20 m de resolución espacial. Los tipos de caminos considerados para este cálculo fueron los pavimentados, de terracería y las brechas.

El cálculo de densidad de caminos se realiza a partir de diversos módulos ejecutables de software libre o comercial referentes a Sistemas de Información Geográfica. En este caso se hace uso de la herramienta Density, que se encuentra en Spatial Analyst/Density del programa ArcMap, Versión 10.2.2. Se establece el tamaño de la malla de 1 km², con la opción de ventana móvil Kernel y un tamaño de píxel de 10 m. La capa resultante consiste en una imagen tipo raster en tonalidades de grises de 0 a 6 valores (Figura 6.33).

Para poder apreciar los valores del archivo tipo raster resultante, se recurrió a hacer una reclasificación, con la herramienta Spatial Analyst/Reclassify (Programa Arc Map, Ver. 10.2.2), de cinco rangos, considerando el valor mínimo (.01 km/km²) y máximo (65 km/km²) de la densidad de caminos con la siguiente clasificación: 1 = Muy baja (<15 km/km²); 2 = Baja (15 – 30 km/km²); 3 = Moderada (30 – 45 km/km²); 4 = Alta (45 – 60 km/km²); 5 = Muy alta (> 60 km/km²) (Figura 6.34).

El siguiente paso consiste en distinguir cuáles son los geosistemas con mayor y menor vulnerabilidad en función de la densidad de caminos y así entender la modificación de los flujos de materia-energía en la ladera ante un derrame de crudo por ductos.

Cabe mencionar que los intervalos de los geosistemas se calculan considerando el valor máximo de la superficie registrada en la densidad de caminos de la zona de estudio. Nuevamente se realiza el análisis de geoprocesamiento de

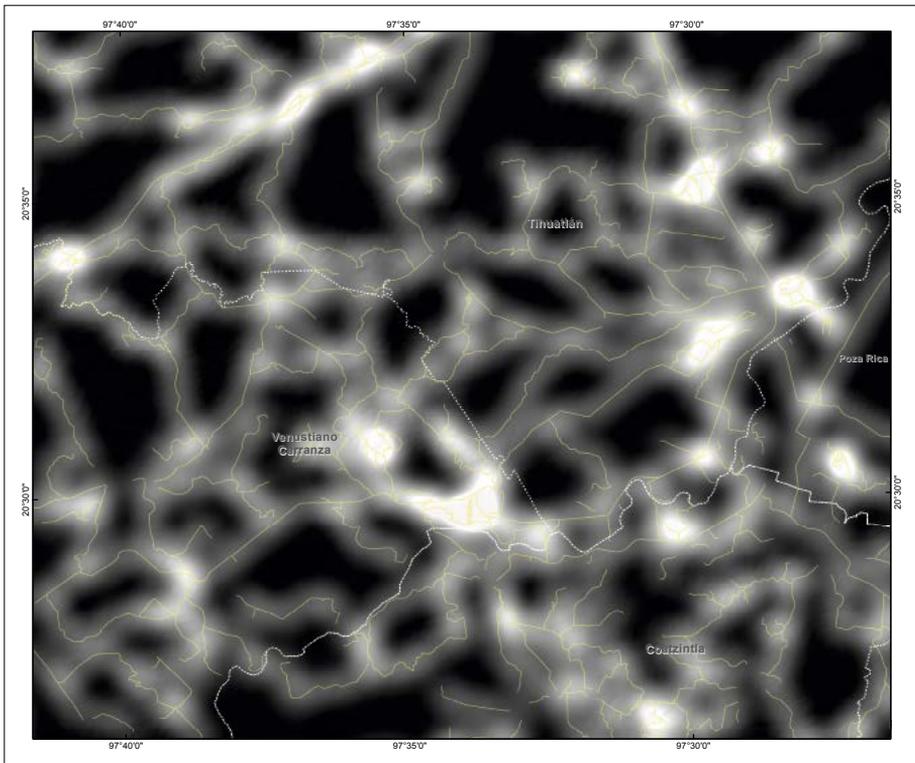


Figura 6.33. Capa de densidad de caminos. Fuente: Elaboración propia con base en la capa vectorial de carreteras de INEGI.

identidad, seguido del cálculo de las superficies en km^2 de los geosistemas por densidad de caminos (Tablas 6.25 y 6.26).

Con los resultados obtenidos se establecen las categorías de vulnerabilidad por tipo de geosistema sólo considerando las categorías de alta y muy alta de densidad de caminos, de acuerdo con los siguientes criterios (Tablas 6.27 y 6.28):

En la Figura 6.35 se muestra el mapa de vulnerabilidad de los geosistemas en función de la densidad de caminos en el cual, además de los nueve tipos de geosistemas considerados a lo largo de este ejemplo, se agregan los geosistemas que representan *a priori* áreas extremadamente vulnerables (muy alta) como las ciudades con más de 15 000 habitantes (Poza Rica) y los cuerpos de agua. Ambos se exponen en el mapa para identificar su distribución espacial en el territorio, los cuales cubren una superficie aproximada de 41.48 km^2 .

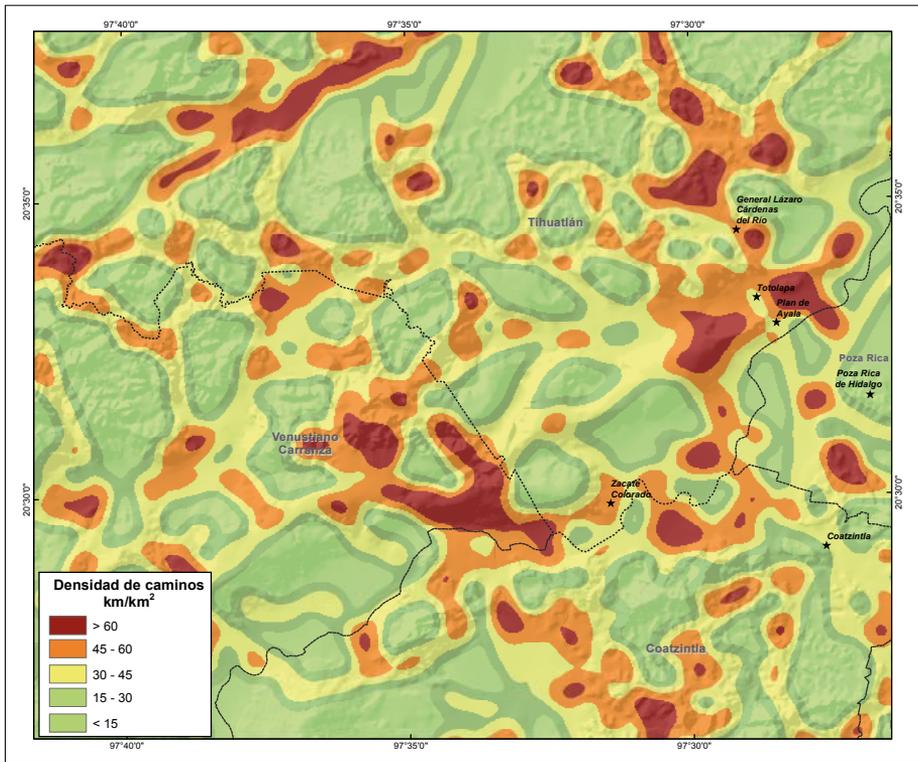


Figura 6.34. Clasificación por densidad de caminos. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.25. Vulnerabilidad en función de la densidad de caminos por tipo de geosistema.

Categoría densidad de caminos	Densidad de caminos (longitud de caminos en km/km ²) por tipo de geosistema*
Muy baja	<15
Baja	15 – 30
Moderada	30 – 45
Alta	45 – 60
Muy alta	>60

*Los valores deberán ajustarse a la región estudiada. Los intervalos se calculan considerando los valores máximo y mínimo registrados en la densidad de caminos. La longitud más corta en el mallado de 1km² es de 0.1km, y el máximo identificado en el mallado es de 65 km.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.26. Relación de tipo de geosistema en función de la densidad de caminos.

Núm.	Geosistemas	Superficie total (km ²) del geosistema en función de la densidad de caminos				
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
		(<15 km/ km ²)	(15 – 30 km/km ²)	(30 – 45 km/km ²)	(45 – 60 km/km ²)	(>60 km/ km ²)
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	0.73	1.64	2.74	3.09	1.07
2	Asentamientos humanos con <15 000 habitantes, con traza urbana	1.81	5.18	6.91	7.32	1.85
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	0.90	0.85	0.50	0.09	0.36
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	5.68	4.62	5.36	1.24	0.89
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	57.25	40.44	53.75	35.61	10.36
6	Pastizal cultivado e inducido	84.43	59.30	71.91	46.04	14.56
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	29.34	14.58	14.71	8.92	2.70
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	69.48	33.93	33.75	19.04	7.05
9	Vegetación de galería	3.37	2.03	2.57	1.39	0.52

Fuente: elaboración propia.

Se considera que, a mayor densidad de caminos, por tipo de geosistema, mayor será la modificación de los flujos de materia-energía en la ladera, por lo tanto, propician una mayor vulnerabilidad intrínseca que podría incidir en el grado de afectación en caso de derrame a partir de ductos; es decir, a mayor densidad de caminos, mayor vulnerabilidad intrínseca.

Tabla 6.27. Vulnerabilidad en función de la densidad de caminos por tipo de geosistema.

Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje de superficie ocupada por una densidad de caminos >45 km/km ² , por tipo de geosistema
Muy baja	<20
Baja	20 – 40
Moderada	40 – 60
Alta	60 – 80
Muy alta	>80

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.28. Vulnerabilidad en función de la superficie ocupada por una densidad de caminos >45 km/km², por tipo de geosistema.

Núm.	Geosistemas	Porcentaje de superficie ocupada por una densidad de caminos >45km/km ² , por tipo de geosistema	Categoría vulnerabilidad
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	45	Moderada
2	Asentamientos humanos con <15 000 habitantes, con traza urbana	40	Moderada
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	17	Muy baja
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	12	Muy baja
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	23	Baja
6	Pastizal cultivado e inducido	22	Baja
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	17	Muy baja
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	16	Muy baja
9	Vegetación de galería	19	Muy baja

Fuente: elaboración propia.

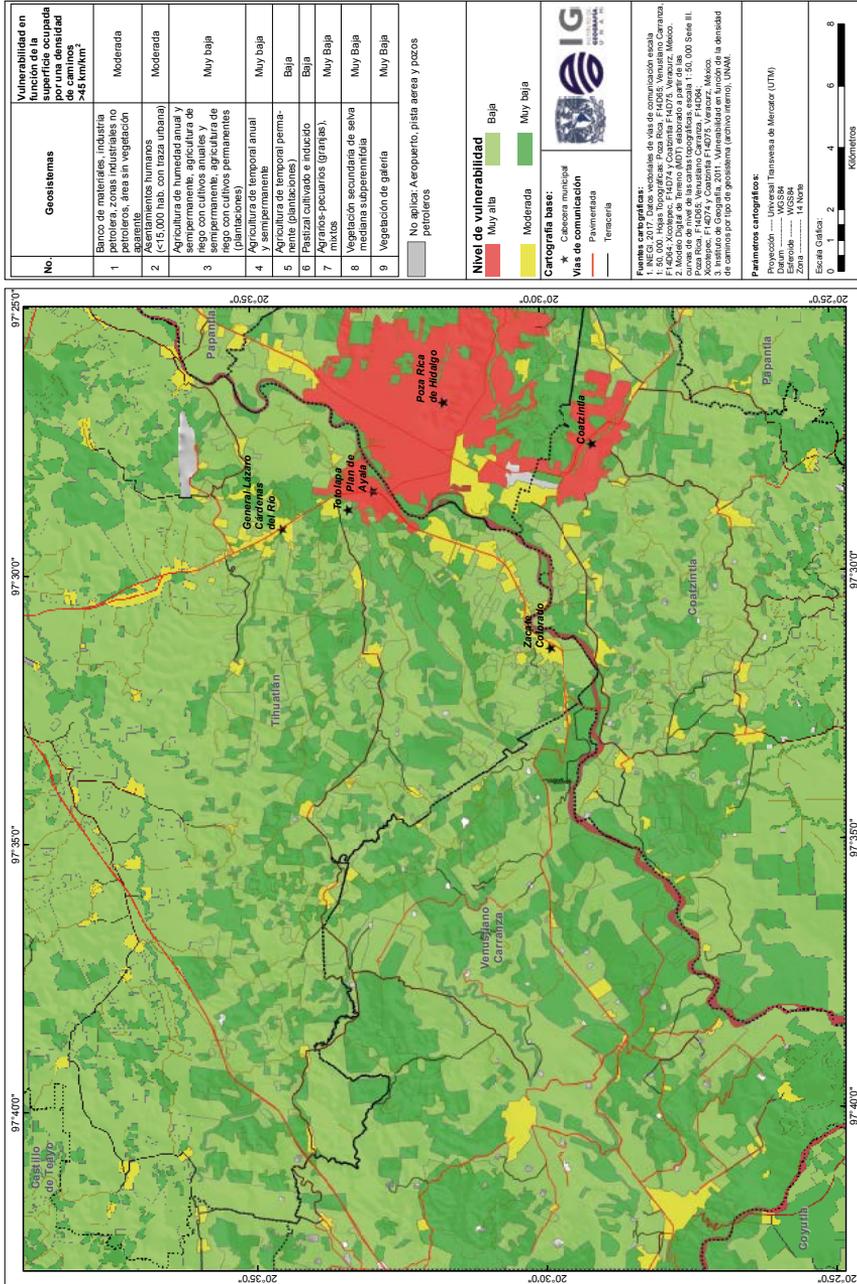


Figura 6.35. Vulnerabilidad en función de la densidad de caminos por tipo de geosistema. Fuente: Elaboración propia con base en las capas espaciales de geosistemas y densidad de caminos.

b) Fragmentación

El grado de fragmentación puede calcularse al relacionar la medición de la superficie total por tipo de geosistema (naturales y semitransformados) con el número de polígonos de vegetación natural (fragmentos) que la conforman; para ello se puede utilizar el software apropiado para tal fin (*p. ej.*, Geosys_fragm) (Parrot y Ramírez, 2012d) o utilizar los métodos tradicionales para el cálculo de áreas.

Derivado de lo anterior, el criterio será que, a menor fragmentación de la vegetación natural (menor número de polígonos por tipo de geosistema), mayor vulnerabilidad intrínseca, ya que el geosistema está más conservado y se desea su protección; es decir, habrá mayor vulnerabilidad intrínseca por tipo de geosistema si se presenta un derrame a partir de ductos si el índice de fragmentación es menor.

El índice de fragmentación se calcula a partir de la capa de geosistemas con el programa Geosys_fragm (Parrot y Ramírez, 2012d), mediante el cálculo de la superficie total y el número de polígonos de vegetación natural de cada geosistema, de tal manera que se puede definir y calcular un parámetro de fragmentación. Este parámetro es igual a:

$$PF = 100 - \left(\left[\frac{Ps}{St} \right] \times 100 \right)$$

Donde:

Ps es el promedio de la superficie de los polígonos de cada geosistema.

St es la superficie total del geosistema. Los valores van de 0 hasta 100, donde 0 representa nula o muy baja fragmentación, y 100, muy alta fragmentación.

También se desarrolló otro parámetro de fragmentación basado en la transformación logarítmica de los valores anteriores, con la finalidad de diferenciar los geosistemas con valor alto de fragmentación. Este nuevo parámetro es igual a:

$$PF2 = 100 - \left(\left[X / \max \right] \times 100 \right)$$

Donde:

$$X = \left(\log \left[\frac{Ps}{St} \right] \times 100 \right) + \min$$

min: corresponde al valor mínimo de la fórmula $X = \left(\log \left[\frac{Ps}{St} \right] \times 100 \right)$ aplicada a todos los geosistemas.

max: corresponde al valor máximo de X .

En la segunda fórmula el valor min permite asegurar una translación con la finalidad de dar el valor mínimo de X a 0; en la primera el valor max se usa para normalizar la escala entre 0 y 100 (Tabla 6.29).

En ambos casos, el programa Geosys_Fragm solicita los valores del umbral de 0 a 100 (Figuras 36a y 36b).

Tabla 6.29. Categorías de fragmentación en función del número de polígonos de vegetación natural.

Categoría de fragmentación	Índice de fragmentación de la vegetación natural*
Muy baja	<20
Baja	21 – 36
Moderada	37 – 58
Alta	59 – 79
Muy alta	>80

*Los valores deberán ajustarse a la región estudiada. Los intervalos se calculan considerando el valor máximo registrado en el índice de fragmentación.

Fuente: elaboración propia.

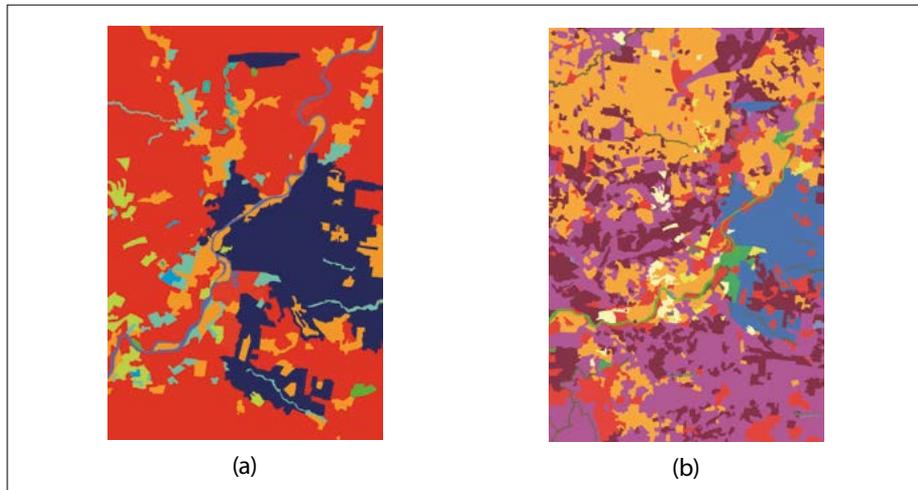


Figura 6.36. Fragmentación de los geosistemas. (a) Parámetro con el promedio de la superficie del geosistema; (b) Parámetro logarítmico. Fuente: Programa Geosys_Fragm (Parrot y Ramírez, 2012d).

En la Figura 6.36a se observa que la fragmentación de los geosistemas está agrupada con base en el umbral establecido, a diferencia de la fragmentación logarítmica (Figura 6.36b), en la que se aprecia una mejor definición de la delimitación de cada geosistema.

Para este análisis se consideró el cálculo de la fragmentación logarítmica, puesto que permite definir con mayor precisión qué geosistema se encuentra más conservado o fragmentado en caso de que haya un derrame de hidrocarburos a partir de oleoductos.

La capa de fragmentación determinada, es necesario clasificarla con los rangos considerados en la Tabla 6.29, y posteriormente calcular la superficie para estimar la vulnerabilidad en función del índice de fragmentación por tipo de geosistema.

En la Figura 6.37 se muestra el índice de fragmentación de 0 a 100 en tonalidades de grises.

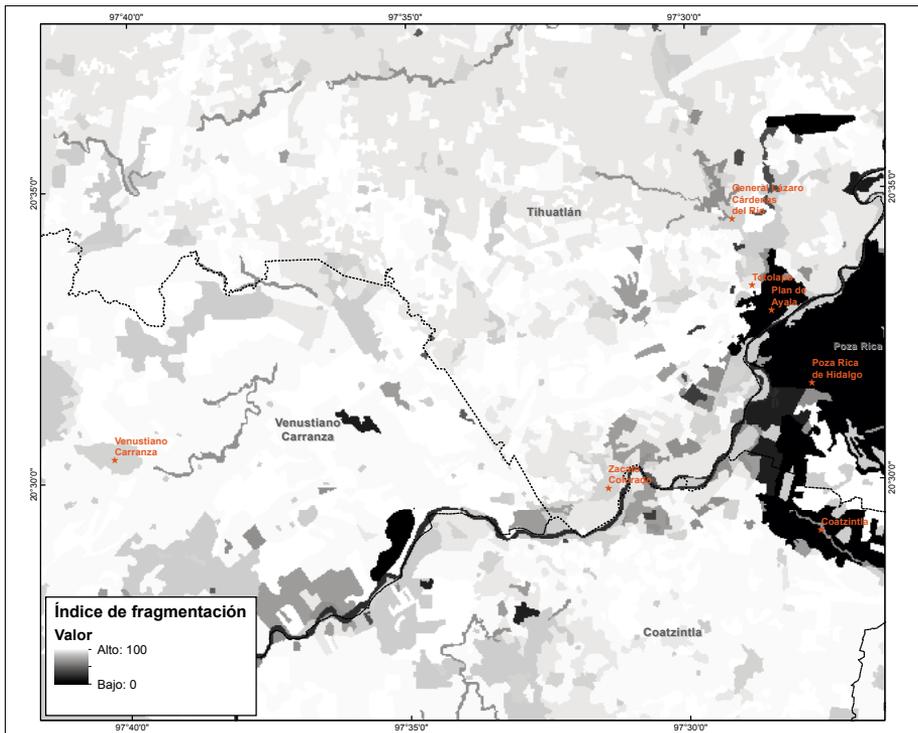


Figura 6.37. Índice de fragmentación en tonalidades de grises. Fuente: Programa Geosys_Fragm (Parrot y Ramírez, 2012d).

Se hace la clasificación por rango de fragmentación, el cual considera los valores de 0 a 100, donde se determinan los 14 valores más representativos de cada geosistema (Figura 6.38).

Una vez clasificado el índice de fragmentación se procede a calcular las superficies y determinar la vulnerabilidad en función del índice de fragmentación (Figura 6.39 y Tabla 6.30).

A menor fragmentación de la vegetación (menor número de polígonos) por tipo de geosistema, se considera mayor vulnerabilidad, ya que se trata de proteger estas unidades espaciales para que no se fragmenten más; es decir, entre más íntegra sea su superficie, será más vulnerable.

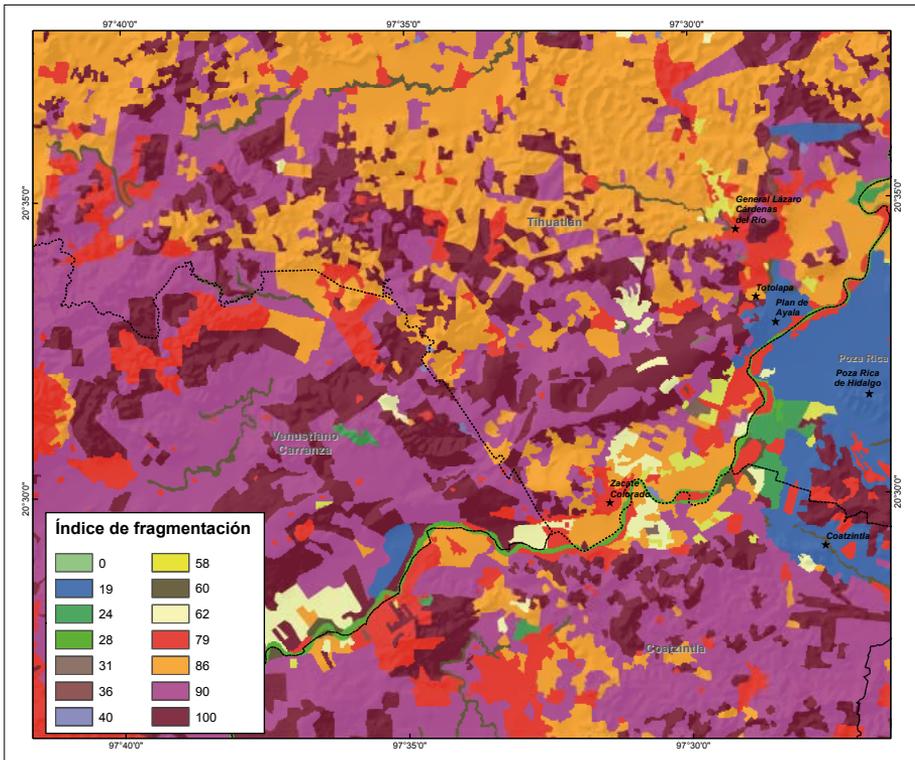


Figura 6.38. Índice de fragmentación por 14 valores de 0 a 100%. Fuente: Programa Geosys_Fragm (Parrot y Ramírez, 2012d).

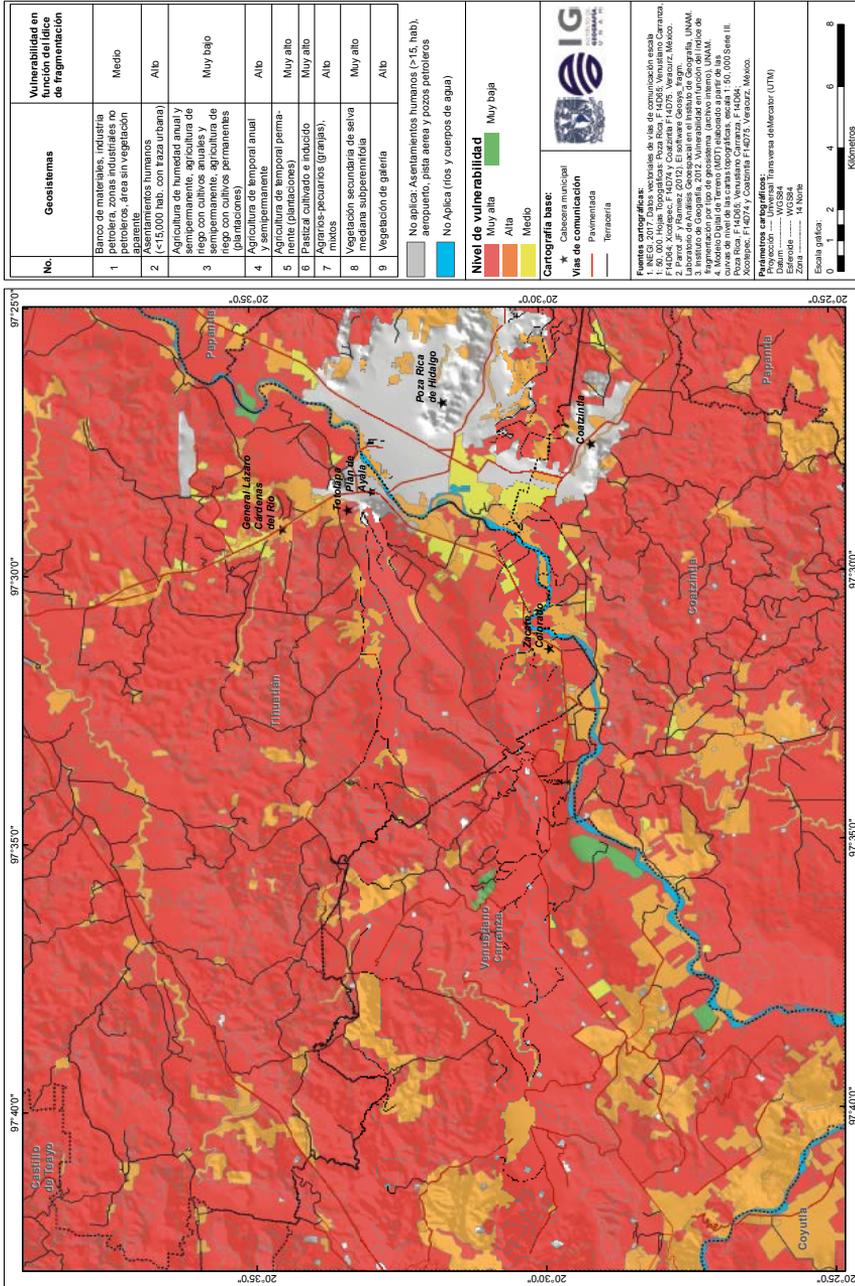


Figura 6.39. Vulnerabilidad en función del índice de fragmentación por tipo de geosistema. Fuente: elaboración propia con base en las capas espaciales de geosistemas y fragmentación.

Tabla 6.30. Vulnerabilidad en función del índice de fragmentación por tipo de geosistema.

Núm.	Geosistemas	Índice de fragmentación
1	Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, área sin vegetación aparente	Medio
2	Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	Alto
3	Agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de riego con cultivos anuales y semipermanente, agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	Muy bajo
4	Agricultura de temporal anual y semipermanente	Alto
5	Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	Muy alto
6	Pastizal cultivado e inducido	Muy alto
7	Agrarios-pecuarios (granjas), mixtos	Alto
8	Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	Muy alto
9	Vegetación de galería	Alto

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 7. Métodos de medición de variables e indicadores: Medio socioeconómico y Vulnerabilidad extrínseca

José María Casado Izquierdo,

Ma. Teresa Sánchez Salazar

Departamento de Geografía Económica

Instituto de Geografía, UNAM

Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco

Ma. Pilar Fernández Lomelín

Departamento de Geografía Física

Instituto de Geografía, UNAM

Vulnerabilidad intrínseca

Cabe recordar que los indicadores del medio socioeconómico se calcularán para cada geosistema (polígono) no urbano, por lo que es necesario asignar los datos a cada uno de manera previa al cálculo del indicador por geosistema.¹⁷ Algunos problemas a los que un usuario puede enfrentarse para generar los indicadores por geosistema se relacionan con la exactitud en la delimitación de los geosistemas y con la ubicación de las localidades puntuales del INEGI. A este respecto se puede considerar que cuando una localidad (punto) se ubica a menos de 100m de un geosistema (polígono) correspondiente a la categoría “Asentamiento humano”, pertenece al asentamiento referido, de manera que su información estadística será anexada a este geosistema pese a no sobreponerse a dicho polígono.

En el caso de localidades que cuentan con más de una AGEB urbana, y cuando alguna de éstas se sobreponga a dos o más tipos de geosistemas, se asignará su información preferentemente al geosistema correspondiente a “Asentamiento humano”, dado que se supone que la mayor parte de la población se localizaría en este tipo más que en otros (*p. ej.*, geosistema industrial o mixto).

¹⁷ Dicha asignación se llevará a cabo mediante un SIG, variando en cada uno el nombre del comando a utilizar. En ArcGIS 9.3 una opción es utilizar el comando Spatial Join.

Respecto a la asignación a los geosistemas de la información correspondiente al DENUE, y también por problemas de exactitud, se sugiere revisar la ubicación de cada unidad económica que tenga más de 51 trabajadores, localizada en las proximidades de dos o más geosistemas. Así, para el caso de estudio desarrollado en Poza Rica, Veracruz, se pudo constatar que la ubicación del complejo procesador de gas de este lugar se sobreponía a un geosistema catalogado como “Asentamiento humano”, aunque muy próximo (menos de 100 m) a uno de tipo industrial, el cual correspondía a su ubicación real; caso similar sucedió con la localización del complejo petroquímico Escolín, el cual se sobreponía a un geosistema correspondiente a un aeropuerto, aunque también muy próximo a uno industrial. Esto puede ser debido, como se mencionó, a problemas en la exactitud, tanto de la delimitación de geosistemas como de la ubicación de las unidades económicas. Cabe señalar que la ubicación de estas últimas en el DENUE se realizó por medio de un proceso de geocodificación, esto es, fueron localizadas en función de su dirección (básicamente nombre de calle y número exterior) y es por eso que tienden a ubicarse preferentemente en zonas clasificadas como asentamientos humanos.

Asimismo, pudiera suceder que tras asignar a los geosistemas la información del Censo de Población 2010 (o más reciente disponible) y del DENUE, algunos geosistemas correspondientes a asentamientos humanos o industriales carezcan de datos de población y/o del DENUE, lo que se debe a las siguientes razones:

- En los datos de población, por ser asentamientos humanos desarrollados con posterioridad al levantamiento censal.
- En el caso del DENUE, por ser asentamientos humanos o zonas industriales poco relevantes demográfica o económicamente, dado que los datos recopilados por el DENUE y los censos económicos se limitan casi exclusivamente a localidades con más de 2 500 habitantes y cabeceras municipales.

Si se diera la situación de que algún geosistema careciera de estadísticas para una o más variables, se considerará que el valor de la variable es 0, lo que a la postre redundará en una menor vulnerabilidad intrínseca del medio socioeconómico; así, si el geosistema careciera de datos de población y de empleo, e incluso de infraestructura, indicaría que se trata de uno con actividad residencial y económica mínima o nula. Si la información es ocultada por el INEGI, por cuestiones de confidencialidad, también se considerará que el valor de la variable es 0, pues

la reserva de la información se produce cuando el valor tiende a ser muy bajo (por lo general, inferior a 3).

Así, en el caso del estudio desarrollado en Poza Rica, Veracruz, para el total de localidades (356), sólo existen datos del Censo de Población 2010 para 162, mientras que para el resto (194) sólo se ofrece el dato de población total, de manera que el valor del resto de variables se oculta por confidencialidad. Respecto de las localidades de las que sí se ofrece información, éstas reúnen 323 480 habitantes frente a 938 de las localidades sin información, y la más poblada de este último tipo cuenta con 17 habitantes.

Una vez calculado el indicador para cada geosistema (polígono) no urbano (véanse los apartados posteriores para su cálculo), será posible conocer los valores máximo y mínimo de la zona de estudio. Para cada indicador se sugiere fijar cinco intervalos, para lo cual existen diversas técnicas estadísticas; en este caso, se propone la utilización de intervalos de igual amplitud (con excepción del índice de rezago social), donde la amplitud del intervalo se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\text{Amplitud del intervalo} = (\text{ValorMáximo} - \text{ValorMínimo})/5$$

Se privilegia de esta manera la búsqueda de diferencias en la zona de estudio, aunque esto limite la comparación de los resultados obtenidos en diferentes zonas de estudio. No se proponen intervalos específicos, como se hace para algunos indicadores del medio biofísico, debido a la imposibilidad técnica para obtener toda la información de los indicadores del medio socioeconómico de todos los geosistemas del país.

Debe considerarse que si bien algunos de los indicadores propuestos están acotados en sus valores mínimos y máximos por tratarse de porcentajes (de 0 a 100), otros no lo están (densidad de población o densidad de empleos), por lo que en estos segundos indicadores es necesario tener en cuenta la posible presencia de valores extremos (outliers) y su influencia en el método propuesto para la fijación de intervalos. En este sentido se sugiere no considerar dichos valores extremos en el proceso de determinación de la amplitud de intervalos arriba indicado, para a posteriori incorporar dichos valores extremos en el intervalo inferior o superior, según sea el caso.

Para la integración de los indicadores del medio socioeconómico se debe revisar el Capítulo Procedimiento de Análisis Jerárquico de esta guía. En las Figuras 4.4 y 6.42 se muestra un resumen del proceso metodológico a seguir, así como una propuesta de ponderadores a utilizar, aunque dichos ponderado-

res quedan a criterio de cada investigación. Cabe subrayar que los indicadores propuestos son orientativos y es posible utilizar otros, medidos mediante otras fórmulas matemáticas, o ampliarse el número de indicadores empleados; todo ello en función de la experiencia e intereses del estudio a desarrollar, así como de la información disponible.

Población

a) Rezago social

A fin de obtener para cada geosistema este índice y su correspondiente grado, el cual se encuentra definido por el Coneval (2011) en cinco categorías, se aplicará la siguiente fórmula:

$$IRSG_i = \sum (IRSL_j \times P_j) / \sum P_j$$

Donde:

$IRSG_i$: índice de rezago social del geosistema i

$IRSL_j$: índice de rezago social de la localidad j ; $j \in i$

P_j : población de la localidad j ; $j \in i$

Una vez calculado el índice de rezago social para cada geosistema, se utilizarán los mismos valores establecidos por el Coneval para distinguir las cinco categorías de rezago, los cuales se muestran en la Tabla 6.31, estableciéndose una equivalencia entre las categorías de rezago y las de vulnerabilidad, por ejemplo, un muy alto rezago es igual a muy alta vulnerabilidad.

Tabla 6.31. Categorías de rezago en función del índice de rezago social, 2010, en la zona de Poza Rica, Veracruz.

Categoría	Índice de rezago social
Muy baja	≤ -0.88855
Baja	Entre -0.88854 y -0.30414
Moderada	Entre -0.30413 y 0.86450
Alta	Entre 0.86451 y 2.03350
Muy alta	≥ 2.03350

b) Población vulnerable

Se proponen dos indicadores, los cuales pueden ser calculados a partir de los datos proporcionados por el último censo de población disponible en la página electrónica del INEGI (2011).

b1) Población indígena. Se calculará de acuerdo con la siguiente fórmula para cada geosistema no urbano:

$$PP5_HLI_i = (\sum P5_HLI_j / \sum P_5yMas_j) \times 100$$

Donde:

PP5_HLI_i: porcentaje de población de 5 años y más, hablante de lenguas indígenas del geosistema *i*

P5_HLI_j: población de 5 años y más hablante de lenguas indígenas de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

P_5yMas_j: población total de 5 años y más de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

De manera orientativa se puede mencionar que a nivel nacional, para el año 2010, el porcentaje de población de 5 años y más hablante de lenguas indígenas fue de 14.5% en localidades con menos de 15 000 habitantes.

b2) Niños y ancianos. Esta variable se calculará de acuerdo con la siguiente fórmula para cada geosistema no urbano:

$$PNyA_i = [\sum (P_Menor15_j + P_Mayor60_j) / \sum PobTot_j] \times 100$$

Donde:

PNyA_i: porcentaje de niños y ancianos del geosistema *i*

P_Menor15_j: población de menos de 15 años de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

P_Mayor60_j: población de más de 60 años de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

PobTot_j: población total de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

Cabe indicar que a nivel nacional, para el año 2010, el porcentaje de niños y ancianos se sitúa en 32.6% de la población total para las localidades con menos de 15 000 habitantes.

c) Población dispersa

A fin de estimar la población dispersa se propone calcular, por geosistema, la

densidad de población residente en localidades con población menor a 15,000 habitantes de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$DPD_i = \sum PoblTot_LocMenor15mil_j / Sup_i$$

Donde:

DPD_i : densidad de población dispersa del geosistema i

$PoblTot_LocMenor15mil_j$: población residente en la localidad j con menos de 15 000 habitantes; $j \in i$

Sup_i : superficie del geosistema i en km^2

Para realizar este cálculo, los datos de las localidades con población menor a 15 000 habitantes se obtienen del último censo o conteo de población, disponible en la página electrónica del INEGI (2011), mientras que la superficie de cada geosistema se calcula a partir de la cartografía de geosistemas (polígonos). De manera indicativa se puede señalar que a nivel nacional esta densidad alcanza un valor aproximado de 21 personas por km^2 en 2010 (personas residentes en localidades con menos de 15 000 habitantes, sin considerar la superficie de las localidades con 15 000 y más habitantes).

Patrimonio personal

Para obtener estas variables se debe consultar el Censo de Población y Vivienda 2010, disponible en la página del INEGI (2011).

a) Viviendas particulares habitadas con piso de tierra

Para cada geosistema se calculará el porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$PVPH_PisoTi_i = (\sum VPH_PisoTi_j / \sum VPH_j) \times 100$$

Donde:

$PVPH_PisoTi_i$: porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra del geosistema i

VPH_PisoTi_j : viviendas particulares habitadas con piso de tierra de la localidad j ; $j \in i$

VPH_j : total de viviendas particulares habitadas de la localidad j ; $j \in i$

A nivel nacional y para localidades con menos de 15 000 habitantes este indicador alcanza 12.2% para 2010.

b) Viviendas particulares habitadas que no disponen de algún servicio

El porcentaje de viviendas habitadas que no disponen de algún servicio se calculará con la siguiente fórmula para cada geosistema:

$$PVPH_S_Serv_i = [\sum(VPH_j - VPH_C_Serv_j) / \sum VPH_j] \times 100$$

Donde:

PVPH_S_Serv_i: porcentaje de viviendas particulares habitadas que carecen de uno o más servicios (luz eléctrica, agua potable entubada de la red pública o drenaje) en el geosistema *i*

VPH_C_Serv_j: viviendas particulares habitadas de la localidad *j* que disponen de todos los servicios: luz eléctrica, agua potable entubada de la red pública y drenaje; *j* ∈ *i*

VPH_j: total de viviendas particulares habitadas de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

Este indicador alcanza a nivel nacional un valor de 37.6% para 2010, y localidades con menos de 15 000 habitantes, aunque considerando únicamente las localidades en donde no se oculta dicha información por cuestiones de confidencialidad.

c) Viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador

A fin de calcular para cada geosistema el porcentaje de viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador se hará uso de la siguiente fórmula:

$$PVPH_SinRefri_i = [\sum(VPH_j - VPH_Refri_j) / \sum VPH_j] \times 100$$

Donde:

PVPH_SinRefri_i: porcentaje de viviendas particulares habitadas sin refrigerador del geosistema *i*

VPH_Refri_j: viviendas particulares habitadas con refrigerador de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

VPH_j: total de viviendas particulares habitadas de la localidad *j*; *j* ∈ *i*

A nivel nacional este porcentaje es 32.0% para localidades con menos de 15 000 habitantes en 2010.

Actividades económicas

A fin de considerar la vulnerabilidad de las actividades económicas, y dada la escasa disposición de información económica a nivel inframunicipal, se plantea el cálculo del siguiente indicador a partir del DENUE (INEGI, 2014).

a) Densidad de empleos

A fin de calcular este indicador, el primer paso consistirá en determinar el número de trabajadores de cada unidad económica de acuerdo con el rango de trabajadores reportado en el DENUE siguiendo la Tabla 6.32. Una vez realizada dicha operación, y tras determinar la pertenencia de las distintas unidades económicas a los diferentes geosistemas, se computará la densidad de empleo para cada geosistema según la siguiente fórmula:

$$DEmp_i = \sum Trab_UE_j / Sup_i$$

Donde:

$DEmp_i$: densidad de empleo del geosistema i

$Trab_UE_j$: número de trabajadores de la unidad económica j ; $j \in i$

Sup_i : superficie del geosistema i en km^2

Esta densidad es de 2.15 trabajadores por km^2 a nivel nacional, considerando las unidades económicas no ubicadas en localidades con 15 000 y más habitantes, de la versión de julio de 2013 del DENUE, de acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2014).

Tabla 6.32. Número de trabajadores propuesto para cada rango de trabajadores.

Rango de trabajadores	Número de trabajadores
0-5	2.5
6-10	8
11-30	20.5
31-50	40.5
51-100	75.5
101-250	175.5
251 y más	Criterio investigador / Trabajo de campo

Infraestructura física

La información relativa a la infraestructura de salud y de protección civil puede ser obtenida de las autoridades locales de la zona de estudio o en el DENU. Por otro lado, la cartografía de infraestructura carretera puede ser extraída de las cartas topográficas escala 1:50 000 del Inegi, o bien pueden utilizarse la Red Nacional de Caminos y el Conjunto de Datos Vectoriales de Carreteras y Vialidades Urbanas, también del Inegi. Otra opción para obtener la cartografía correspondiente a la infraestructura carretera es solicitar esta información al Instituto Mexicano del Transporte o a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

En cualquier caso es importante considerar la actualidad de la información acerca de infraestructura, pues se trata de un elemento dinámico que se modifica en el transcurso de los años, por lo que es posible que se requiera su actualización.

Los elementos que integran la infraestructura señalada presentan diferente nivel de importancia; por ejemplo, la relevancia de la infraestructura carretera puede ser considerada según el tipo de vía (brechas o carreteras pavimentadas), su capacidad (número de carriles) o su carácter estratégico (por ejemplo, un puente, por ser la única vía de escape de la población). Por ello, se sugiere ponderar de manera diferenciada cada elemento de la infraestructura en función de la importancia otorgada.

Para llevar a cabo esta ponderación se propone contar con la colaboración de autoridades locales, sobre todo de protección civil y personal del sector salud, para definir la importancia relativa de cada elemento de la infraestructura de la zona de estudio. Los elementos por considerar pueden ser, para la infraestructura carretera, el tipo de vía y número de carriles, mientras que para la infraestructura de salud y protección civil, el número de trabajadores con los que se cuenta (como un *proxy*), dato que puede obtenerse del mismo DENU.

Una vez realizada la ponderación, se calculará para cada geosistema no urbano la suma del número ponderado de instalaciones correspondientes a infraestructura de salud, y se repetirá esta operación para la infraestructura de protección civil. En el caso de la infraestructura carretera se propone lo siguiente: multiplicar la longitud de cada tramo de vía por el ponderador considerado, en función del tipo de vía y número de carriles. Finalmente, tanto para la infraestructura carretera como de salud y protección civil, una vez obtenido el mencionado dato ponderado, se dividirá entre la superficie del geosistema, expresada en kilómetros cuadrados.

a) Infraestructura carretera

El indicador correspondiente a este tipo de infraestructura se calculará de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$DInfrCarrPond_i = \sum(Long_{jk} \times Pond_k)_j / Sup_i$$

Donde:

DInfrCarrPond_i: densidad de infraestructura carretera ponderada correspondiente geosistema *i*

Long_{jk}: longitud en kilómetros del tramo de carretera *j* correspondiente a la categoría *k*; $j \in i$

Pond_k: ponderador establecido para las carreteras de categoría *k* en función del tipo de vía y número de carriles

Sup_i: superficie del geosistema *i* en km²

b) Infraestructura de salud

La densidad de infraestructura de salud ponderada se fijará con la fórmula siguiente:

$$DInfrSaludPond_i = \sum(Est_{jk} \times Pond_k)_j / Sup_i$$

Donde:

DInfrSaludPond_i: densidad de infraestructura de salud ponderada correspondiente al geosistema *i*

Est_{jk}: número de establecimientos de salud *j* correspondiente a la categoría *k*; $j \in i$

Pond_k: ponderador establecido para los establecimientos de salud de categoría *k* en función del número de trabajadores u otro criterio

Sup_i: superficie del geosistema *i* en km²

c) Infraestructura de protección civil

El cálculo de este indicador se llevará a cabo según la fórmula siguiente:

$$DInfr ProtCvilPond_i = \sum(Est_{jk} \times Pond_k)_j / Sup_i$$

Donde:

DInfr ProtCvilPond_i: densidad de infraestructura de protección civil ponderada correspondiente al geosistema *i*

Est_{jk} : número de establecimientos de protección j correspondiente a la categoría k ; $j \in i$ (estaciones de bomberos, albergues y refugios, policía, etcétera)

$Pond_k$: ponderador establecido para los establecimientos de protección civil de categoría k en función del número de trabajadores u otro criterio

Sup_i : superficie del geosistema i en km^2

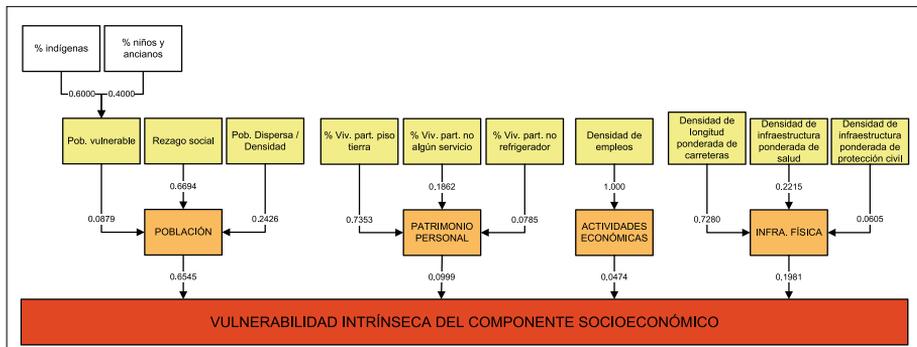
En la Figura 6.40 se observan los indicadores, categorías y ponderadores propuestos para el medio socioeconómico.

Vulnerabilidad extrínseca

Cálculo de la vulnerabilidad extrínseca por derrame de petróleo a partir de oleoductos

La vulnerabilidad extrínseca se evalúa en función de la amenaza. Para continuar con el ejemplo de derrame de crudo a partir de ductos en la zona de Poza Rica y municipios aledaños se considera, por un lado, la métrica espacial entre los polígonos y, por el otro, variables como el número de ductos que transportan el hidrocarburo, la distancia de estos ductos a poblaciones humanas; a zonas muy comprometidas por su cercanía, por ejemplo, campos agrícolas, y a vías o medios que puedan dispersar rápidamente el crudo derramado (Figura 6.41).

Para el ejercicio se utiliza, a manera de ejemplo, la densidad de oleoductos. Las demás variables se trabajan de la misma manera.



*La suma de los ponderadores empleados en cada integración de indicadores puede no sumar 1 debido al redondeo de decimales.

Figura 6.40. Diagrama de indicadores, categorías y ponderadores propuestos para el medio socioeconómico. Fuente: elaboración propia.

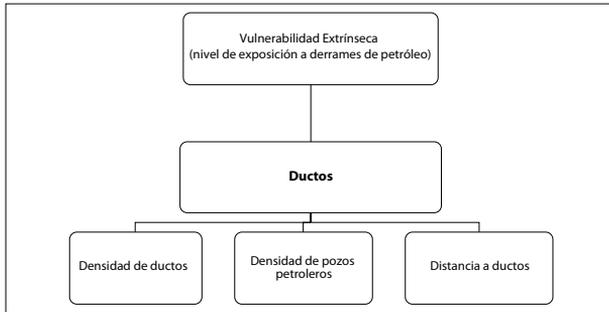


Figura 6.41. Diagrama de las variables propuestos para la evaluación de la vulnerabilidad extrínseca. Fuente: elaboración propia.

Densidad de oleoductos

Se refiere a la relación de la longitud de ductos (en km) por unidad de superficie (km²), por geosistema. Para este ejercicio se utilizará el geosistema de pastizales, ya que es el más representativo en cuanto a su superficie. En este caso, se trabaja por polígono. El criterio es: a mayor densidad de ductos dentro de un geosistema, mayor su vulnerabilidad extrínseca, debido a las probabilidades de estar expuesto a un derrame.

Para obtener la densidad de oleoductos, se parte de la capa vectorial de conductos del INEGI, escala 1:50 000, que se refiere a los ductos pertenecientes a Pemex. También se debe contar con la capa de los polígonos que pertenecen al geosistema de pastizales, y con ésta se podrá hacer un *clip* (corte) para sólo seleccionar los ductos que se ubiquen dentro de los pastizales. Al obtener dicha capa, se realiza el mismo procedimiento que se ocupa para la densidad de caminos, y para calcular la categoría de vulnerabilidad (Tabla 6.33), se considera el valor máximo de longitud registrado en la zona de estudio.

En la Figura 6.42 se muestra el mapa de vulnerabilidad en función de la densidad de oleoductos en el geosistema pastizales.

Tabla 6.33. Vulnerabilidad extrínseca en función de la densidad de oleoductos.

Categoría de vulnerabilidad	Densidad de ductos (km/km ²) por geosistema de pastizales
Muy baja	<0.19
Baja	0.20 – 0.43
Media	0.44 – 0.76
Alta	0.77 – 1.07
Muy alta	>1.07

Capítulo 8. Procedimiento de Análisis Jerárquico

*Irene Sommer Cervantes, Pilar Fernández Lomelín,
Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco*

Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, UNAM

Jean-François Parrot Faure
Laboratorio de Análisis Geoespacial
Instituto de Geografía, UNAM

Mayelli Hernández Juárez
Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, UNAM

José María Casado Izquierdo, Ma. Teresa Sánchez Salazar
Departamento de Geografía Económica
Instituto de Geografía, UNAM

En el Capítulo Procedimiento de Análisis Jerárquico (Parte I) se muestran los pasos de este procedimiento (PAJ). Aquí se describen a detalle los cálculos involucrados en la resolución de las matrices para obtener, por un lado, los pesos de las variables por nivel jerárquico y, por el otro, las calificaciones relativas por tipo de geosistema para cada una de las variables que se comparan (Banai-Kashani, 1989).

Paso 1: Construcción del modelo-esquema jerárquico

Se construye el modelo (véanse Figuras 4.1, 4.4, 5.1 y 5.2 de la Parte I y 6.41 de la Parte II).

Paso 2: Estimación de los pesos para cada variable y cada nivel de la jerarquía

Consiste en lo siguiente:

1. Asignación de valores. Se comparan dos elementos y se asigna un valor conforme a la escala referida en la Tabla 7.1 (Banai-Kashani, 1989), que comprende un puntaje del 1 al 9.

Tabla 7.1. Escala de valores cualitativos para calificar (comparando por pares) variables o geosistemas.

Valores intermedios*	Importancia	Definición
2	1	Misma importancia. Las dos condiciones contribuyen en igual intensidad al objetivo.
4	3	Importancia moderada. La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una condición sobre la otra.
6	5	Importancia esencial o fuerte. La experiencia o el juicio favorecen fuertemente una condición sobre la otra.
8	7	Importancia demostrada. Se ha demostrado en la práctica que una condición domina sobre la otra.
	9	Importancia extrema. Se ha demostrado en la práctica que una condición domina en extremo a la otra.

*Se usan si no ajustan los valores de la segunda columna.

Fuente: Saaty (1987).

Normalmente, se prefiere el uso de los números nones; así, 1 indica que los dos elementos que se comparan son similares; 3, que existe una leve diferencia entre ellos, y así hasta llegar al 9, por el que se establece que hay una diferencia máxima entre los dos elementos. Pueden usarse los números 2, 4, 6 y 8 para calificaciones intermedias.

Estos números se acomodan en una matriz de valores (es recíproca, con valores de 1 en la diagonal). Estas comparaciones por pares se hacen para todos los elementos de la matriz.

2. Se suman los valores por columna.
3. Se divide cada valor de celda que conforma la primera columna entre el valor de la suma total de ésta. Se hace el mismo procedimiento con las demás columnas. Con estos valores se genera una segunda matriz.
4. Se calcula el promedio por renglón de la segunda matriz, valor que equivale a la importancia relativa (peso) por cada elemento que la constituye. La importancia relativa de cada factor se obtiene como proporción (valores entre 0 y 1), producto de un "criterio cuantificado".

Este procedimiento se aplica en los siguientes casos:

- a) Para jerarquizar las variables e índices elegidos con la finalidad de describir el problema.

- b) Para jerarquizar las opciones (geosistemas) conforme a cada una de las variables seleccionadas (el total de matrices que resulta es equivalente al número de variables seleccionadas).

Para explicar la tarea de llevar a cabo las comparaciones pareadas se presenta el siguiente ejemplo en el que se consideran cinco categorías de vulnerabilidad (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta):

Se desea hacer una comparación entre 9 geosistemas con respecto al tipo de roca dominante menos resistente a la erosión fluvial, por tipo de geosistema, en la región de Poza Rica (Litología) (véase Figura 6.7, Tablas 6.5, 6.6 y 6.7 del Capítulo Métodos de medición de variables e indicadores de la Parte II y la Tabla 7.2).

1. Asignación de valores:

- Si al llevar a cabo la comparación entre dos geosistemas resultan muy parecidos, es decir, se encuentran en la misma categoría, se asigna un valor de 1 (igualmente importantes en función de la distancia a ductos).
- Si caen en categorías adyacentes, se califica con 3 (un poco diferentes en cuanto a distancia a ductos).
- Si hay una categoría intermedia de separación, se califica con 5 (medianamente diferentes entre sí).

Tabla 7.2 Matriz con las calificaciones de las comparaciones pareadas de la variable tipo de roca dominante menos resistente a la erosión fluvial por tipo de geosistema (litología).

Matriz 1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	1	1/7	1/5	3	3	3	2	1/3
C2	1	1	1/7	1/5	3	3	3	3	1/3
C3	7	7	1	2	9	9	9	9	5
C4	5	5	1/2	1	7	7	7	7	3
C5	1/3	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C6	1/3	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C7	1/3	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C8	1/2	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C9	3	3	1/5	1/3	5	5	5	5	1
Suma por columna	18.50	18.33	2.43	4.30	31.00	31.00	31.00	30.00	10.47

Fuente: elaboración propia. C1-C9 corresponden a los tipos de geosistema identificados en la zona de estudio (Tabla 6.7).

- Si hay dos categorías intermedias de separación, se da un valor de 7 (muy diferentes entre sí).
- Y finalmente, si hay tres categorías intermedias de separación entre los valores, se califica con 9 (en extremo diferentes).
- Si el geosistema del renglón es más vulnerable (menos distancia a ductos) que el de la columna (más distante), se pone el valor del entero (3, 5, 7, 9); si el de la columna es más vulnerable que el del renglón, se utilizan las fracciones (1/3 o 1/5 o 1/7 o 1/9). Con estos valores comparativos se construye una matriz (véase Tabla 6.7 y Tabla 7.2).

Una vez elaborada la matriz, producto de las comparaciones pareadas, se continúa con el procedimiento.

2. Se suman los valores por columna.
3. Se divide cada celda que conforma la primera columna entre el valor de la suma total de ésta. Se hace lo mismo para las demás columnas. Con esto se construye una segunda matriz (Tabla 7.3).
4. Se calcula el promedio, por renglón, de esta segunda matriz para obtener el peso.

Así se obtienen los pesos que esta variable adopta en cada uno de los tipos de geosistemas considerados. La suma de los pesos de todos los geosistemas (C1-C9) por columna debe sumar 1 (puede no ser exactamente 1 por el redondeo).

Tabla 7.3 Matriz para el cálculo del peso de la variable que considera el tipo de roca dominante menos resistente a la erosión fluvial por tipo de geosistema (litología).

Matriz 2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Peso promedio
C1	0.054	0.055	0.059	0.046	0.097	0.097	0.097	0.067	0.032	0.067
C2	0.054	0.055	0.059	0.046	0.097	0.097	0.097	0.100	0.032	0.071
C3	0.378	0.382	0.411	0.465	0.290	0.290	0.290	0.300	0.478	0.365
C4	0.270	0.273	0.206	0.232	0.226	0.226	0.226	0.233	0.287	0.242
C5	0.018	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.033	0.019	0.029
C6	0.018	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.033	0.019	0.029
C7	0.018	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.033	0.019	0.029
C8	0.027	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.033	0.019	0.030
C9	0.162	0.164	0.082	0.077	0.161	0.161	0.161	0.167	0.096	0.137

Fuente: elaboración propia. C1-C9 corresponden a los tipos de geosistema identificados en la zona de estudio (Tabla 6.7).

Se procesa una matriz de este tipo para cada una de las variables consideradas.

Paso 3. Cálculo del índice de inconsistencia (CR)

Una vez construidas las matrices, se procede a calcular el índice de inconsistencia de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Los elementos de la primera columna de la matriz original (comparaciones pareadas) se multiplican por el peso de la variable calculado por geosistema (o por variable). Esto se hace en cada una de las columnas. Con estos datos se construye una nueva matriz.
2. Se suman los valores de cada renglón de esta matriz y se dividen entre los pesos de los criterios. Al promedio de estos valores se le llama λ_{max} (λ_{max}).
3. Se calcula ahora el valor inicial de inconsistencia (CI) con la siguiente fórmula:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

Donde:

n = total de columnas o renglones de la matriz

Ejemplo: $CI = (9.28 - 9) / 8$

$$CI = 0.035$$

4. Se busca el valor de referencia RI propuesto por Saaty (1987) para matrices aleatorias (para $n = 9$, $RI = 1.45$). (Tabla 7.4).
5. El índice de inconsistencia final se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$CR = CI / RI$$

Ejemplo: $CR = 0.030$ o 3.0%

De acuerdo con Saaty (1987), si el CR es menor a 10% , el nivel de inconsistencia incorporado en las matrices se considera aceptable (Tabla 7.5).

Los pesos para cada una de las variables en la zona de estudio, por tipo de geosistema para la estimación de la vulnerabilidad intrínseca, se presentan en la Tabla 7.6.

Cálculo de los pesos de los componentes de los diversos niveles del esquema jerárquico para evaluar la vulnerabilidad

Con el procedimiento descrito en la sección anterior se calculan los pesos de las diferentes variables considerando el modelo-esquema jerárquico mencionado en

el Capítulo Métodos de integración de resultados. A continuación se presenta un resumen de los cálculos de los pesos para cada variable (Tablas 7.7 a 7.13). Se debe recordar que es muy importante la opinión de expertos y el conocimiento de la zona para esta etapa de evaluación.

Se estableció un peso de 0.6 para el medio biofísico y 0.4 para el socioeconómico, con el fin de evaluar la vulnerabilidad intrínseca segundo nivel de la Figura 5.2.

Se realiza el mismo procedimiento para estimar la vulnerabilidad intrínseca del medio socioeconómico.

Paso 4. Cálculo de los índices globales

Finalmente, se calculan los índices globales para cada tipo de geosistema de la siguiente manera:

1. Se multiplica el valor del peso calculado (del paso 3) por tipo de geosistema de cada variable específica por el peso de esa variable que también ya se calculó por nivel. Esta operación se hace por cada nivel del esquema jerárquico propuesto. Para seguir con el ejemplo de la variable Resistencia del tipo de roca dominante a la erosión fluvial (Litología), los pesos estimados por geosistema (C1-C9) para esta variable se multiplican por 0.112, (véase el cálculo de los pesos de las variables del componente abiótico en la Tabla 7.8). Se realiza la misma operación para todas las variables.
2. Se suman los valores del conjunto de variables de cada uno de los componentes; es decir, se agrupan las variables teniendo en cuenta la

Tabla 7.4. Valores de referencia (RI) propuestos por Saaty (1987).

Tamaño de la matriz	Valor de RI
1 x 1	0
2 x 2	0
3 x 3	0.58
4 x 4	0.90
5 x 5	1.12
6 x 6	1.24
7 x 7	1.32
8 x 8	1.41
9 x 9	1.45
10 x 10	1.49

Fuente: Saaty, 1987

Tabla 7.5. Matriz para el cálculo del índice de inconsistencia. Variable litología (tipo de roca dominante con menor resistencia a la erosión fluvial).

Matriz 1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	1	1/7	1/5	3	3	3	2	1/3
C2	1	1	1/7	1/5	3	3	3	3	1/3
C3	7	7	1	2	9	9	9	9	5
C4	5	5	1/2	1	7	7	7	7	3
C5	1/3	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C6	1/3	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C7	1/3	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C8	1/2	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1/5
C9	3	3	1/5	1/3	5	5	5	5	1
Suma por columna	18.50	18.33	2.43	4.30	31.00	31.00	31.00	30.00	10.47

Matriz 2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Cálculo	
										Peso promedio	CI
C1	0.054	0.055	0.059	0.046	0.097	0.097	0.097	0.067	0.032	0.067	9.092
C2	0.054	0.055	0.059	0.046	0.097	0.097	0.097	0.071	0.032	0.071	9.046
C3	0.378	0.382	0.411	0.465	0.290	0.290	0.290	0.365	0.478	0.365	9.762
C4	0.270	0.273	0.206	0.232	0.226	0.226	0.226	0.242	0.287	0.242	9.720
C5	0.018	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.029	0.019	0.029	9.086
C6	0.018	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.029	0.019	0.029	9.086
C7	0.018	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.029	0.019	0.029	9.086
C8	0.027	0.018	0.046	0.033	0.032	0.032	0.032	0.030	0.019	0.030	9.154
C9	0.162	0.164	0.082	0.077	0.161	0.161	0.161	0.137	0.096	0.137	9.469

LAMBDA	9.278
CI	0.035
RI	1.45
CR	0.024

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.6. Pesos de las diferentes variables por tipo de geosistema en la región de Poza Rica, Veracruz.

		Medio biofísico									
Geo-sistema	Potencial erosivo	Litología*	Densidad de disección	Pendiente >18°	Densidad de cabeceras	Convergencia en planta	NDVI	Concentración de vegetación	Densidad de caminos	Fragmentación	
C1	0.291	0.067	0.035	0.077	0.091	0.120	0.016	0.057	0.262	0.171	
C2	0.050	0.071	0.082	0.077	0.091	0.120	0.026	0.057	0.262	0.076	
C3	0.052	0.365	0.239	0.077	0.091	0.120	0.088	0.160	0.046	0.434	
C4	0.151	0.242	0.041	0.077	0.091	0.120	0.048	0.057	0.046	0.076	
C5	0.050	0.029	0.091	0.077	0.273	0.120	0.092	0.057	0.123	0.030	
C6	0.052	0.029	0.091	0.077	0.091	0.120	0.092	0.057	0.123	0.030	
C7	0.151	0.029	0.091	0.385	0.091	0.120	0.213	0.057	0.046	0.076	
C8	0.151	0.030	0.091	0.077	0.091	0.120	0.213	0.441	0.046	0.030	
C9	0.050	0.137	0.239	0.077	0.091	0.040	0.213	0.056	0.046	0.076	
Medio socioeconómico											
Geo-sistema	Índice rezago social	Población indígena	Población niños y ancianos	Población dispersa	Viviendas con piso de tierra	Viviendas sin algún servicio	Viviendas sin refrigerador	Empleo	Densidad de carreteras	Infraestructura salud	Protección civil
C1	0.019	0.085	0.253	0.158	0.087	0.046	0.068	0.502	0.347	0.059	0.059
C2	0.018	0.085	0.253	0.018	0.087	0.084	0.068	0.142	0.347	0.529	0.529
C3	0.172	0.033	0.018	0.018	0.017	0.017	0.019	0.051	0.036	0.059	0.059
C4	0.033	0.177	0.056	0.158	0.031	0.188	0.036	0.051	0.092	0.059	0.059
C5	0.181	0.033	0.116	0.158	0.190	0.188	0.128	0.051	0.036	0.059	0.059
C6	0.181	0.033	0.056	0.158	0.190	0.188	0.265	0.051	0.036	0.059	0.059
C7	0.033	0.436	0.116	0.158	0.190	0.084	0.133	0.051	0.036	0.059	0.059
C8	0.181	0.085	0.116	0.158	0.190	0.188	0.265	0.051	0.036	0.059	0.059
C9	0.181	0.033	0.018	0.018	0.017	0.017	0.020	0.051	0.036	0.059	0.059

*Se resalta en gris la variable litología, a la cual se ha hecho referencia durante el ejercicio. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.7. Cálculo de los pesos de las variables para evaluar vulnerabilidad del medio biofísico (tercer nivel de la Figura 5.2). Medio biofísico: tercer nivel

Medio biofísico					
	Componente abiótico	Componente biótico	Influencia antrópica		Pesos
Medio abiótico	1	3	1/3	Medio abiótico	0.260
Medio biótico	1/3	1	1/5	Medio biótico	0.106
Influencia antrópica	3	5	1	Influencia antrópica	0.634
CR=					0.033
Secuencia: Influencia antrópica>Medio abiótico>Medio biótico					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.8. Cálculo de los pesos de las variables para evaluar vulnerabilidad del componente abiótico del medio biofísico. Componente abiótico: cuarto nivel

Subtemas del componente abiótico						
	PotErosivo	Morfometría	Litología	Morfografía		Pesos
Pot Erosivo	1	3	5	6	Pot Erosivo	0.558
Morfometría		1	3	4	Morfometría	0.259
Litología			1	2	Litología	0.112
Morfografía				1	Morfografía	0.071
Secuencia: Pot Erosivo>Morfometría>Litología>Morfografía						
CR=						0.033

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.1 para el caso del medio biofísico, la Figura 4.4 para el medio socioeconómico, así como la Figura 5.2. Por ejemplo, el resultado de la variable litología se suma con los de morfometría, morfografía y potencial de erosión (por tipo de geosistema), para los cuales se hizo el mismo procedimiento; la suma C1-C9 debe ser 1.00. Con ello se completa el componente abiótico (cuarto nivel). Esto se hace para todos los niveles hasta

Tabla 7.9. Cálculo de los pesos de las variables para evaluar vulnerabilidad de la variable Morfometría (componente abiótico del medio biofísico).

Morfometría: quinto nivel					
Morfometría					
	Pendientes >18°	Densidad Disección	Densidad Cabeceras		Pesos
Pend >18°	1	3	5	Pend >18°	0.633
Dens. Disec.		1	3	Dens. Disec.	0.260
Dens. Cab.			1	Dens. Cab.	0.106
Secuencia: Pend +18°>DensDisección>DensCabeceras				CR=	0.033

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.10. Pesos de la variable Convergencia en planta.

Morfografía: quinto nivel	
Morfografía	Peso
Convergencia en planta	1.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.11. Cálculo de los pesos de las variables del componente biótico para evaluar vulnerabilidad.

Componente biótico: cuarto nivel	
Componente biótico	Peso
NDVI	0.40
Concentración de la vegetación	0.60

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.12. Cálculo de los pesos de las variables del componente biótico para evaluar vulnerabilidad.

Componente antrópico: cuarto nivel	
Componente antrópico	Peso
Densidad de caminos	0.40
Fragmentación	0.60

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.13. Cálculo de los pesos de las variables para evaluar vulnerabilidad del medio socioeconómico.

Medio socioeconómico: primer nivel						
Medio socioeconómico						
	Población	Infraestructura física	Patrimonio	Actividades económicas		Pesos
Población	1	6	7	9	Población	0.70
Infraestructura física	1/6	1	3	5	Infraestructura física	0.20
Patrimonio	1/7	1/3	1	3	Patrimonio	0.10
Actividades económicas	1/9	1/5	1/3		Actividades económicas	0.05
	1				CR =	0.093

Secuencia: Población>Infraestructura física>Patrimonio>Actividades económicas

Fuente: elaboración propia.

llegar al segundo nivel, que es la vulnerabilidad intrínseca del área de estudio, o hasta el cálculo de la vulnerabilidad regional (véase Figura 5.2). En resumen, las calificaciones de los medios abiótico, biótico e influencia antrópica son el resultado de multiplicar la suma de sus componentes por su peso. La calificación del medio biofísico se obtiene con la suma de estos tres componentes.

3. Para el cálculo final, se ordenan creciente o decrecientemente los valores y se divide el rango (valor mayor-valor menor) entre el número de categorías preseleccionado (en este caso se usaron cinco categorías de vulnerabilidad) con el fin de establecer los intervalos de valores propios de cada categoría; también puede recurrirse a criterios reportados en la literatura o discutidos y acordados de acuerdo con la situación particular.

Paso 5. Valores límite por categoría de vulnerabilidad

Se establecen los valores límite por categoría de vulnerabilidad, es decir, los puntos de corte por categoría. Para ello, se normaliza el rango de valores obtenido para la calificación final y se divide entre el número de categorías.

Se transforman los valores con una calificación con base 100. Para el estudio desarrollado, el rango se dividió en cinco clases con las siguientes categorías (Tabla 7.14).

Tabla 7.14 Categorías de vulnerabilidad base 100.

Categorías de vulnerabilidad con base 100	
Muy alta	>80
Alta	60 – 80
Media	40 – 60
Baja	20 – 40
Muy baja	<20

Fuente: elaboración propia.

La secuencia de geosistemas teniendo en cuenta la vulnerabilidad intrínseca con las variables consideradas en este estudio del medio biofísico es la siguiente: C3>C1>C2>C7>C8>C4>C9>C6>C5 (Tabla 7.15 y Figura 7.1).

Tabla 7.15. Vulnerabilidad intrínseca del medio biofísico.

Medio biofísico		
Geosistemas	Calificación base 100	Categoría de vulnerabilidad intrínseca
C1 Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, áreas sin vegetación aparente	85	Muy alta
C2 Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	54	Moderada
C3 Agricultura de humedad (anual y semipermanente), agricultura de riego (cultivos anuales y semipermanentes), agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	100	Muy alta
C4 Agricultura de temporal (anual y semipermanente)	37	Baja
C5 Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	30	Baja
C6 Pastizal cultivado e inducido	30	Baja
C7 Mixtos y agrarios-pecuarios (granjas)	44	Moderada
C8 Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	42	Moderada
C9 Vegetación de galería	33	Baja

Fuente: elaboración propia.

La secuencia de geosistemas teniendo en cuenta la vulnerabilidad intrínseca con las variables consideradas en este estudio del medio socioeconómico es la siguiente: C8>C5>C6>C1>C2>C9>C3>C7>C4 (Tabla 7.16 y Figura 7.2).

La secuencia de geosistemas teniendo en cuenta la vulnerabilidad intrínseca con las variables consideradas en este estudio del medio socioeconómico es la siguiente: C3>C1>C2>C8>C5>C6>C7>C9>C4 (Tabla 7.17 y Figura 6.7.3).

Con los resultados obtenidos se realizan los mapas definiendo las áreas con diferente grado de vulnerabilidad en la zona de estudio. A continuación se muestran los mapas de la vulnerabilidad intrínseca del medio biofísico (Figura 7.1) y del medio socioeconómico (Figura 7.2). El mapa 7.3 es el resultado de la integración del medio biofísico y el socioeconómico.

Como se mencionó anteriormente, la vulnerabilidad extrínseca también puede trabajarse por polígonos o por tipo de geosistema u otra unidad espacial,

Tabla 7.16. Vulnerabilidad intrínseca del medio socioeconómico.

Medio socioeconómico		
Geosistemas	Calificación base 100	Categoría de vulnerabilidad intrínseca
C1 Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, áreas sin vegetación aparente	92	Muy alta
C2 Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	81	Muy alta
C3 Agricultura de humedad (anual y semipermanente), agricultura de riego (cultivos anuales y semipermanentes), agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	65	Alta
C4 Agricultura de temporal (anual y semipermanente)	52	Moderada
C5 Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	98	Muy alta
C6 Pastizal cultivado e inducido	98	Muy alta
C7 Mixtos y agrarios-pecuarios (granjas)	62	Alta
C8 Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	100	Muy alta
C9 Vegetación de galería	68	Alta

Fuente: elaboración propia.

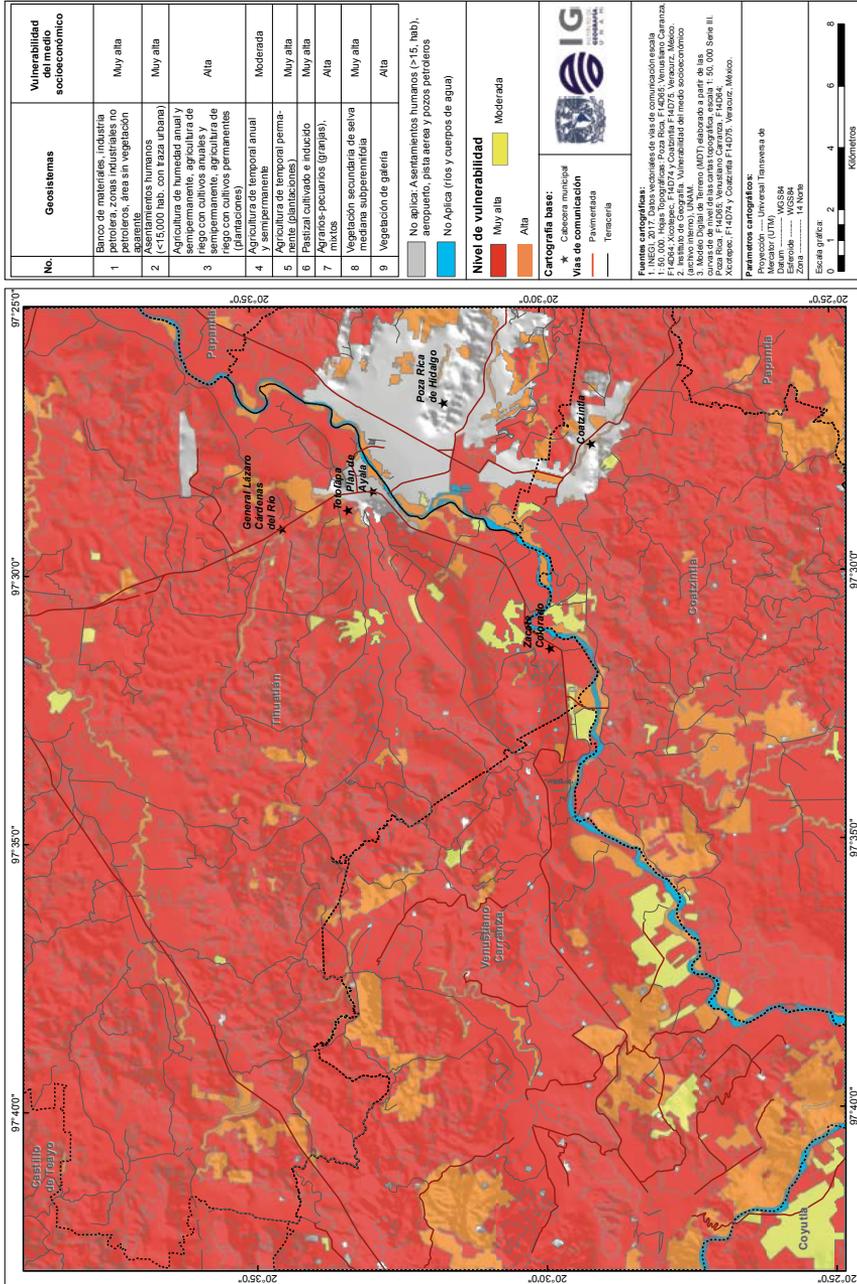


Figura 7.2. Mapa de vulnerabilidad del medio socioeconómico. Fuente: elaboración propia.

según el objetivo del trabajo, y realizar la cartografía combinando estos dos métodos (*p. ej.*, Figura 7.3 y Figura 6.44).

Tabla 7.17. Vulnerabilidad intrínseca de la región de Poza Rica, Veracruz.

Vulnerabilidad intrínseca		
Geosistemas	Calificación base 100	Categoría de vulnerabilidad intrínseca
C1 Banco de materiales, industria petrolera, zonas industriales no petroleras, áreas sin vegetación aparente	97	Muy alta
C2 Asentamientos humanos (<15 000 habitantes, con traza urbana)	69	Alta
C3 Agricultura de humedad (anual y semipermanente), agricultura de riego (cultivos anuales y semipermanentes), agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones)	100	Muy alta
C4 Agricultura de temporal (anual y semipermanente)	47	Moderada
C5 Agricultura de temporal permanente (plantaciones)	56	Moderada
C6 Pastizal cultivado e inducido	56	Moderada
C7 Mixtos y agrarios-pecuarios (granjas)	55	Moderada
C8 Vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia	66	Alta
C9 Vegetación de galería	49	Moderada

Fuente: elaboración propia.

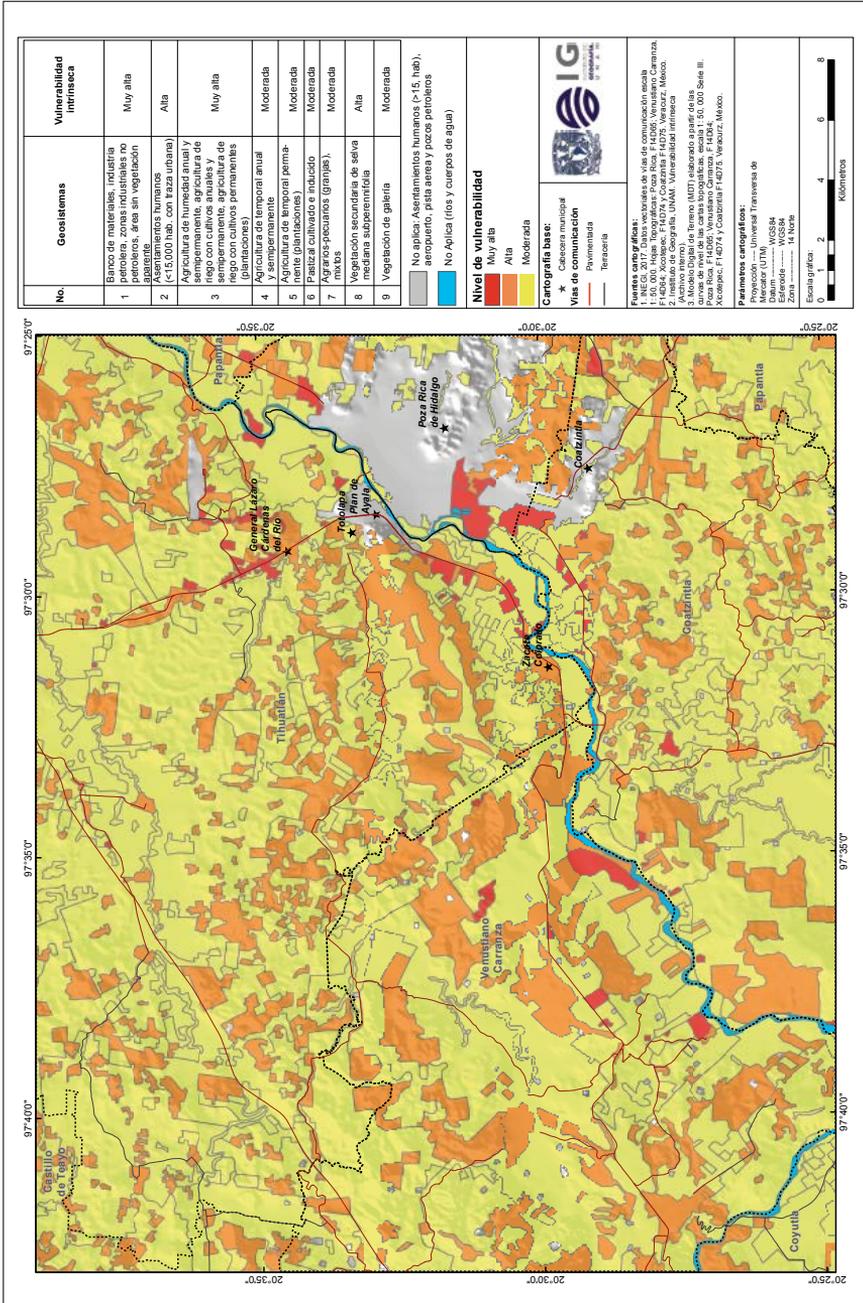


Figura 7.3. Mapa de vulnerabilidad intrínseca. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

En esta guía se propone una serie de variables e índices para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de unidades espaciales frente a derrames de petróleo crudo. La vulnerabilidad intrínseca hace referencia a las características propias de las unidades espaciales de análisis que generan una vulnerabilidad inherente. En este caso se utilizan geosistemas, que se delimitan en función de las coberturas y usos del suelo. Se seleccionaron variables del medio biofísico y del medio social para hacer la determinación de la vulnerabilidad mencionada. Se eligió como área de aplicación de la guía la zona de Poza Rica, Veracruz, por ser de interés prioritario, debido a la ocurrencia de derrames de petróleo; comprende parte del municipio de Poza Rica y los contiguos de Coatzintla, Tihuatlán y Venustiano Carranza, y una pequeña superficie del municipio de Papantla.

Mediante álgebra de mapas, se conjugan tanto la vulnerabilidad del medio biofísico como del medio social para crear un mapa de vulnerabilidad intrínseca de la zona de estudio. Los resultados muestran que los geosistemas con muy alta vulnerabilidad en esta área de estudio (sobre base 100) corresponden a la agricultura de humedad (anual y semipermanente), agricultura de riego (cultivos anuales y semipermanentes), agricultura de riego con cultivos permanentes (plantaciones) (C3 = 100), así como bancos de materiales, instalaciones de la industria petrolera, zonas industriales no petroleras y áreas sin vegetación aparente (C1 = 97). Con vulnerabilidad alta resultaron los geosistemas que pertenecen a asentamientos humanos con menos de 15 000 habitantes (C2 = 69), que presentan una traza urbana cartografiable a la escala de trabajo, y los geosistemas con vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia (C8 = 66). Los demás grupos de geosistemas obtuvieron una categoría de vulnerabilidad intrínseca moderada: agricultura de temporal permanente (plantaciones) (C5 = 56), pastizal cultivado e inducido (C6 = 56), mixtos y agrarios-pecuarios (granjas) (C7 = 55), vegetación de galería (C9 = 49) y agricultura de temporal (anual y semipermanente) (C4 = 47).

La vegetación de galería no refleja la importancia que tiene como ecosistema ripario; se esperaría un resultado con mayor vulnerabilidad. Esto conlleva replantear las variables seleccionadas para el medio físico, así como la escala de manejo espacial. Otra limitante tiene que ver con la prioridad que se les dio a los procesos

denudativos sobre los acumulativos, por lo que todas las unidades que tienen una función de acumulación muestran un sesgo. Lo anterior conduce a proponer un cambio en el modelo conceptual para considerar desde un inicio la separación de los procesos de denudación-acumulación, e incorporar las variables que definen las zonas con crecidas normales y crecidas extraordinarias que potencialmente sean más vulnerables.

La determinación de la vulnerabilidad extrínseca (en función de la amenaza específica), se llevó a cabo con un ejercicio de acuerdo con la densidad de oleoductos que atraviesan geosistemas de pastizales, éstos se seleccionaron toda vez que son los más representativos de la zona. La vulnerabilidad regional (vulnerabilidad intrínseca más vulnerabilidad extrínseca) respecto a dichos pastizales resultó muy baja.

Se considera un acierto haber definido la vulnerabilidad intrínseca con base en las características espaciales de los medios abiótico, biótico y socioeconómico; los mapas resultantes reflejan con bastante aproximación este componente del riesgo.

Asimismo, el procedimiento propuesto puede aplicarse no sólo en relación con los derrames de crudo, sino también con otros tipos de amenazas, tanto de origen natural como socionatural y antrópico. Igualmente, es factible la aplicación de la metodología a otras de las regiones prioritarias nacionales de máxima concentración de infraestructura petrolera, no sólo respecto a los derrames de oleoductos, sino también a otro tipo de ductos.

De las metodologías revisadas para analizar vulnerabilidad se observó que generalmente se utilizan demasiadas variables (30-50), que atomizan los resultados y pueden sesgarlos. Lo valioso de nuestra metodología es que se basa en variables integrales (menos variables).

La función de esta guía es orientar o encaminar hacia el objetivo de estimar la vulnerabilidad de un territorio frente a derrames derivados de oleoductos, a partir de algunas variables e índices más representativos para tal fin, por lo que se sugiere que, para aplicar la metodología en una determinada región, se conozca la dinámica propia de la zona de estudio, así como la temporalidad, y usar el sentido común para adaptar lo que aquí se recomienda a las variaciones que se observen. Es decir, la guía es indicativa y debe ser diferenciada de acuerdo con las condiciones particulares de cada territorio y cada situación.

El equipo de trabajo mínimo necesario para realizar una evaluación de vulnerabilidad regional conforme a esta guía debe estar integrado por un grupo multidisciplinario que incluya a un geógrafo físico o profesional en Ciencias de la Tierra, un geógrafo social o profesional en Ciencias Sociales, un ecólogo o profe-

sional en manejo de recursos naturales, un profesional en Sistemas de Información Geográfica y uno que maneje programas estadísticos, entre otros.

Como toda versión simplificada del mundo real, la metodología propuesta constituye una versión esquematizada y reduccionista de la realidad, por lo que debe tenerse presente que los atributos considerados en esta guía son únicamente válidos para una escala de trabajo regional (1:250 000-1:50 000), con la consecuente pérdida de información de detalle en escalas más finas. Sin embargo, la metodología permite establecer un grado de vulnerabilidad más detallado de los geosistemas, llevando a cabo el proceso por unidad o polígono, es decir, considerando los elementos ubicados en cada una de dichas unidades territoriales.

Los atributos seleccionados y su evaluación se refieren únicamente al estado actual de las unidades territoriales, independientemente de su aptitud o vocación natural. Por ejemplo, zonas que teóricamente deberían estar ocupadas por diversos tipos de selvas o bosques se clasifican como vegetación secundaria o acahual, porque es la cobertura actual que presentan; de la misma manera, las áreas con cultivos se clasifican de acuerdo a su cobertura y tipo de agricultura, independientemente de la aptitud que tengan los suelos.

Sería importante que para evaluar la vulnerabilidad extrínseca, se tuviera muy bien descrita la amenaza, lamentablemente, es muy difícil contar con información suficiente de los ductos de Pemex, pues es considerada confidencial. A pesar de esta situación, el nivel de aproximación se considera aceptable. Por otra parte, se privilegia el enfoque de la vulnerabilidad y no tanto el de la amenaza, cuyo análisis es más frecuente.

Por otro lado, a partir de la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-027- SESH- 2010: “Administración de la Integridad de Ductos de Recolección y Transporte de Hidrocarburos”, es obligatorio que todas aquellas entidades que transportan y recolectan hidrocarburos desarrollen un programa de administración de integridad, con información del estado en que se encuentran los ductos, tanto respecto de la integridad mecánica, la evaluación de las condiciones de seguridad y la confiabilidad en la operación como de la evaluación del riesgo de que los ductos puedan sufrir rupturas. En otras palabras, se deben analizar las amenazas (eventos) que pueden afectar la integridad de los ductos. Para ello, Pemex Exploración y Producción desarrolló el Programa de Administración de la Integridad de Ductos para identificar bajo qué condiciones los ductos son más vulnerables a presentar una falla, así como la severidad de las consecuencias (González, 2013). Entre las variables que se utilizan para hacer esta evaluación, están las del entorno, sobre todo aquellas que son indicadoras de la estabilidad del terreno (posibilidad de movimiento del terreno y la presencia de cuerpos de agua).

Para aplicar esta guía, se reitera que se requiere de la conformación de un grupo multidisciplinario que tenga cierto nivel de conocimientos en los temas que se abordan; por ejemplo, en cuanto al manejo de datos del medio físico y socioeconómico, información espacial y aplicación de los métodos de análisis multicriterio. A continuación se dan algunas recomendaciones generales importantes para aplicar la metodología.

Para la selección de las variables e índices de vulnerabilidad propuestos en esta guía se siguieron las recomendaciones generales que existen en la literatura al respecto (véase Apéndice), pero se puso especial cuidado en que la información a utilizar ya existiera o se pudiera obtener a bajo costo; esto es, se usó información disponible en datos estadísticos obtenidos de los últimos censos del INEGI (2010 y 2011b), indicadores socioeconómicos emitidos oficialmente por el Conapo y el Coneval, y la cartografía base y temática (en formato digital o impresa) del INEGI. Igualmente, se utilizó información derivada de la interpretación de los mapas de topografía, geología, suelos, vegetación, uso del suelo y de las imágenes satelitales o fotografías aéreas actualizadas.

Agradecimientos: A Blanca Estela Morales y a José Manuel Figueroa MahEng por el apoyo técnico en la elaboración de documentos cartográficos.

Referencias

Parte I

- Adger, N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, 268-281.
- Adger, N., Kelly, M. y Bentham, G. (2001). New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. International Workshop on Vulnerability and Global Environmental Change, Lila Nyagatan. International Workshop (17 de mayo-19 de mayo de 2001) Estocolmo, Suecia.
- Águeda, J., Anguita, F., Araña, V., López, J. y Sánchez de la Torre, L. (1983). *Geología* (2a. ed.). Madrid: Editorial Rueda.
- Ajayi, A. E., Dias Junior, M. S., Curi, N., Okunola, A., Teixeira Souza, T. T. y Silva Pires, B. (2010). Assessment of Vulnerability of Oxisols to Compaction in the Cerrado Region of Brazil. *Pedosphere*, 20(2), 252-260.
- APPRA (2014). Datos espaciales de ductos de Pemex por la Coordinación de Diseño de Exploración. Activo de Producción Poza Rica-Altamira.
- Banai-Kashani, R. (1989). A New Method for Site Suitability Analysis: The Analytic Hierarchy Process. *Environmental Management*, 13. 685-693.
- Bazant Sánchez, J. (1983). *Manual de criterios de diseño urbano*. México: Editorial Trillas.
- Bernis Franquet, J. M., Albacar Damian, M. A. y Tallada de Esteve, F. (2017). *Problemática del río Ebro en su tramo final*. Informe acerca de los efectos sobre el área jurisdiccional de la Comunidad de Regantes-Sindicato Agrícola del Ebro. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:UNEDCentroAsociadoTortosa-Libros-5040/Franquet_Bernis_Problematica.pdf
- Blanno, M. y Ruiz-Saucedo, U. (2007). *Anexo 1: Análisis estadístico de las emergencias ambientales en suelos mexicanos durante el periodo 2003-2006*. Proyecto GTZ-Semarnat: Residuos peligrosos y sitios contaminados (informe final no publicado).
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A. y Burgos, A. (2010). *La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial. Una revisión bibliográfica*. México: Instituto Nacional de Ecología-Semarnat-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-UNAM.

- Boughton, D. A., Smith, E. R., O'Neil, R. V. (1999). Regional Vulnerability: A Conceptual Framework. *Ecosystem Health*, 15, 312-322.
- Cardona, O. M. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En: A. Maskrey (Comp.), *Los desastres no son naturales*. Colombia: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina-Tercer Mundo Editores.
- CEOTMA (Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente) (1991). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología* (3a ed.). Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos) (2019). Producción de petróleo y gas por cuenca y ubicación. Sistema de Información de Hidrocarburos. Recuperado de <https://sih.hidrocarburos.gob.mx/> el 24 de abril de 2019.
- CNR (Comisión Nacional de Reconstrucción) (1986). Comisión de Prevención de Seguridad Civil. Bases para el establecimiento del Sistema Nacional de Protección Civil.
- Coepa (Confederación Empresarial de la Provincia de Alicante) (2007). *El riesgo ambiental. Guía de Gerencia de Riesgos Ambientales* [PDF].
- COM (2004). Protección de las infraestructuras críticas en la lucha contra el terrorismo. En *Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo*. Bruselas: Comisión de las Comunidades Europeas.
- CONCAWE (Falta el nombre completo) (2002). *Western European Cross-Country Oil Pipelines 30. Year Performance Statistics*. Bruselas: CONCAWE.
- Coneval (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) (2011). Índice de rezago social 2010 a nivel municipal y por localidad. Recuperado de <http://www.coneval.gob.mx> el 19 de enero de 2012.
- Coque, R. (1984). *Geomorfología*. México: Alianza Editorial.
- Cram, S., Sommer, I., Oropeza, O. y Mendoza-Cantú, A. (Coords.; 2010). *Atlas regional de impactos derivados de actividades petroleras en Coahuila de Zaragoza, Veracruz, México*: Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Instituto de Geografía-UNAM.
- CRE (Comisión Reguladora de Energía) (2017). Permiso de transporte por ducto de acceso abierto de gas natural sin procesar para el sistema gas marino - mesozoico otorgado a Pemex Logística. Recuperado de <http://www.pemex.com/nuestro-negocio/logistica/Documents/GAS%20MARINO%20MESOZICO%20GAS%20NATURAL%20G-20275-TRA-2017.pdf> el 24 de abril de 2019.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I. C. y Zwahlen, F. (2002). Main Concepts of the "European approach" to Karst-Groundwater-Vulnerability Assessment and Mapping. *Hydrogeology Journal*, 10, 340-334.

- Dey, P. K. (2002). An Integrated Assessment Model for Cross-Country Pipelines. *Environmental Impact Assessment Review*, 22, 703-721.
- Dey, P. K., Ogunlana, S. O., Gupta, S. S. y Tabucanon, M. T. (1998). A Risk Based Maintenance Model for Cross-Country Pipelines. *Cost Engineerin*, 40, 24-31.
- Dramstad, W. E., Olson, J. D. y Forman, R. T. T. (1996). Landscape Ecology Principles. En *Landscape Architecture and Land-Use Planning. Graduate School of Design*. Washington, D.C.: Harvard University-Island Press-American Society of Landscape Architects.
- Espinosa-Rodríguez, L. M. (2009). Metodología para la evaluación morfoedáfica en sistemas de laderas en zonas templadas. *Ciencia Ergo Sum*, 16. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10412057006> el 10 de octubre de 2014.
- Fairbridge, R. W. (1968). *Encyclopedia of Geomorphology* (vol. III).
- Florenzano, T. G. (2008). *Geomorfología: conceptos e tecnologías atuais*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Folke, C. (2006). Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-Ecological Systems Analysis. *Global Environmental Change* 16(3), 253-267.
- Forman, R. T. T. y Alexander, L. E. (1998). Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 207-231.
- Forman, R., Sperling, D., Bissonette, J., Clevenger, A., Cutshall, C., Dale, V., Fahrig, L., France, R., Goldman, C., Heanue, K., Jones, J., Swanson, F., Turrentine, T. y Winter, T. (2003). *Road Ecology, Science and Solutions*. Washigton: Island Press.
- Gárfias J., Franco, R. y Llanos, H. (2002). Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 2, 115-126.
- Gómez-Escobar, M. C. (2004). Métodos y técnicas de la cartografía temática. III. Métodos y técnicas para el estudio del territorio. En *Temas Selectos de Geografía de México*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Gómez-Orea, D. (2007). *Ordenación territorial* (2a ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- González-Otero, L. (1994). Enfoque geosistémico en la investigación geográfica del medio ambiente cubano. En *geografía del medio ambiente. Una alternativa del ordenamiento ecológico*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Guerra, F. (1980). *Fotogeología*. Facultad de Ingeniería-UNAM.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) (1996). *Guía metodológica para la formulación del plan de ordenamiento territorial urbano, aplicable a ciudades*. Colombia.

- IGACC (Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba) (1989). Sección XXIII. Medio ambiente. En *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional de España.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2007). *Elaboración de una metodología para la identificación de sitios ambientalmente sensibles a los efectos por derrames de hidrocarburos* (informe final). Convenio de colaboración INE/A1-009/2007. México: Instituto de Geografía-UNAM-Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2008). *Validación en campo de variables e índices de vulnerabilidad en sitios ambientalmente sensibles a derrames de hidrocarburos en la región de Coatzacoalcos* (informe final). México: Instituto de Geografía-UNAM-Instituto Nacional de Ecología- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2009). *Modelación del comportamiento ambiental de derrames de hidrocarburos en sitios ambientalmente sensibles* (informe final). Convenio de colaboración INE/A1-001/2009. México: Instituto de Geografía-UNAM-Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2010). *Comparación estacional del comportamiento de derrames de hidrocarburos en sitios ambientalmente sensibles* (informe final). Convenio de colaboración INE/A1-011/2010. México: Instituto de Geografía-UNAM-Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2011a). *Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad (ITER)*. Recuperado de <http://www.censo2010.org.mx/> en mayo de 2011.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2011b). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/DENUE/Presentacion.aspx> en mayo de 2011.
- IPADE Business School y Strategy& (s.f.). *Visión 2021. Estructura del sector energético mexicano. ¿Dónde están las oportunidades y qué capacidades se requieren para capturarlas?* (Estudio elaborado en el marco del 1er. Encuentro del Sector Energético). IPADE Business School-Universidad Panamericana-Strategy & Parte de la Red de PwC.
- Jiménez-Madrid, A., Carrasco-Cantos, F., Martínez-Navarrete, C. (2009). Análisis comparativo de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos carbonáticos. *Boletín geológico y minero*, 120(1), 81-94.
- Jones, K. B., Ritters, K. H., Wickham, J. D., Tankersley, R. D., O'Neill, R. V., Chaloud, D. J., Smith, D. R. y Neale, A. C. (1997). *An Ecological Assessment of the United States Mid-Atlantic Region: A Landscape Atlas*. EUA: USDA-U. S. Forest Service.

- Leopold, L. B., Wolman, M. G. y Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco: Freeman.
- Lugo, H. J. I. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada. (Métodos cartográficos)*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Lugo, J. (2011). *Diccionario geomorfológico. Geografía para el siglo XXI*.
- Mañas, F. M. (2009). Protección de infraestructuras críticas frente a la amenaza yihadista. Vulnerabilidades del sector energético: petróleo. *Athena Assessment*, 5(09).
- Mendoza-Cantú, A., Cram Heydrich, S., Sommers-Cervantes, I. y Oropeza-Orozco, O. (2011). Identification of Environmental Vulnerable Priority Areas to Prevent and Manage Pipeline Oil Spills. *Journal of Environmental Management*, 92, 1706-1713.
- Meyerink, A. M. J. (1970). Photo-Interpretation in Hydrology. A Geomorphological Approach. Chapter VII, 3. En *Use of Photographs in Geomorphology* (vol. VII, ITC textbook of photo-interpretation). International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences.
- Molinet Coll, V. s/a. Restauración del Delta del Ebro I. Recuperación de la configuración del Delta del Ebro. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3322/55870-7.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Moput (Ministerio de Obras Públicas y Transportes) (1991). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología* (3a ed.). Madrid.
- Morales, L. M. (2009). *The Definition of a Minimum Set of Spatial Relationships*. Tesis de Doctorado. UNAM, México.
- Narváez L., Lavell, A. y Pérez-Ortega, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: Un enfoque basado en procesos* [PDF]. Lima: Comunidad Europea-Secretaría General de la Comunidad Andina.
- O'Neal, R. V., Hunsaker, C. T., Jones, K. B., Riitters, K.H., Wickham, J. D., Schwartz, P. M., Goodman, I. A., Jackson, B. L. y Baillargeon, W. S. (1997). Monitoring Environmental Quality at the Landscape Scale. *Bioscience*, 47, 513-519.
- Olivera-Villaseñor, R. E. y Rodríguez-Castellanos, A. (2005). Estudio del riesgo en ductos de transporte de gasolinas y diésel en México. *Científica*, 9, 159-165.
- Oropeza, O. y Enríquez, C. (2003). Vulnerabilidad global de los geosistemas. Clave VI.6, escala 1:1 000 000. En M. T. Sánchez y O. Oropeza (Coords.), *Atlas regional del Istmo de Tehuantepec* (Versión digital). México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Oropeza, O., Mitre, L. M., Nava, F., Meyer, K. J., Serrano, J. R. y Alba, A. O. (1999). Impacto ambiental y peligros naturales y antrópicos en la Península de Yucatán. En *Atlas de procesos territoriales de Yucatán*. México: Facultad de Arquitectura-Universidad Autónoma de Yucatán.

- Oropeza, O., Palacio, A. G. y D'Luna, A. (1992). Síntesis del medio ambiente. Hoja V.5.1. Mapa a escala 1:4 000 000. En *Atlas Nacional de México*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Ortiz-Pérez, M. A. (1998). Programa de actualización del ordenamiento ecológico general del territorio del país. Segunda fase: Diferenciación tipológica de las regiones ecológicas de México, en la modalidad de nivel 5. Escala 1:250 000 (120 mapas). Dirección de Normatividad Ambiental. Departamento de Ordenamiento Ecológico. México: Instituto de Geografía-UNAM-Instituto Nacional de Ecología-Semarnat.
- Osorio, J. C. y Orejuela, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica*, 39(XIV), 247-252.
- Parrot, J. F. (2009). DEM Simulation of Petroleum Flux Extension and Diffusion Due to Pipeline Ruptures in Mexico. En R. S. Anderssen, R. D. Braddock y L. T. H. Newham (Eds.), *MODSIM2009* (pp. 2701-2705). International Congress of Modelling and Simulation.
- Parrot, J. F. (2012). Geosys_explor (módulo ejecutable Ms-Dos).
- Parrot, J. F. (2012c). Geosys_explor (módulo ejecutable Ms-Dos) [Software interno]. Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE). México: Instituto de Geografía-UNAM
- Parrot, J. F. y Ramírez-Núñez, C. (2012d). Geosys_fragm [módulo ejecutable interno]. Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE). México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Pedraza, G. J. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. España: Editorial Rueda.
- Pemex (Petróleos Mexicanos) (2013). La alianza Pemex-Mexichem no implica la desincorporación de Pajaritos. *Boletín Regional de Prensa*.
- Pemex (Petróleos Mexicanos) (2018a). *Anuario estadístico 2017*. México.
- Pemex (Petróleos Mexicanos) (2018b). *Archivo interno*. México.
- Pérez, R. y Pacheco, J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, 8(1), 33-42.
- Perles, M. J. y Cantarero, F. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio. Propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multipeligros. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52, 245-271.
- Perles, M. J., Gallego, A. y Cantarero, F. (2006). Análisis del ajuste del área inundable obtenida mediante una evaluación integrada de la peligrosidad de inundación y peligros asociados. *Baética*, 28.
- PMI (PMI Comercio Internacional, S.A. de C.V). (2019) Petróleo crudo. Recuperado de <http://www.pmi.com.mx/Paginas/PetroleoCrudo.aspx> el 24 de abril de 2019.

- Repsol, Y. P. F. (2010). Control de la corrosión interna. Oleoducto puesto Hernández-Luján de Cuyo. Dirección de Terminales y Ductos. Recuperado de http://www.iapg.org.ar/sectores/eventos/eventos/eventos_iapg/2006/JornadaIntegridad-Nov2006/CorrosionInterna2.pdf en agosto de 2014.
- Romero G., Maskrey, A. (1993). Cómo entender los desastres naturales. En A. Maskrey (Comp.), *Los desastres no son naturales*. Colombia: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina-Tercer Mundo Editores.
- Rosgen, D. L. (1994). A Classification of Natural River. *Catena*, 22, 169-199.
- Sánchez Salazar, M. T. y Martínez Laguna, N. (2010). Infraestructura industrial de Pemex. En Heydrich (Ed.), *Atlas regional de impactos derivados de las actividades petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz, México* (pp. 14-17). Instituto Nacional de Ecología-Semarnat-Instituto de Geografía-UNAM.
- Sánchez, M. T. y Oropeza, O. (Coords; 2003). *Atlas regional del Istmo de Tehuantepec. Industria petrolera y cambios territoriales en el marco de la globalización económica: El caso del Istmo de Tehuantepec* [versión digital]. México: Instituto de Geografía-UNAM
- Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. Nueva York: John Wiley. Figure 1.1, p. 3,
- Selley, R. C. (1976). *Medios sedimentarios antiguos*.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2002). *Guía para la presentación del estudio de riesgo ambiental Nivel 2. Análisis de Riesgo*. Recuperado de http://www.saludambiental.udg.mx/maestria/II_dip_files/m3/ev-n2.pdf
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2017). Lineamientos para la protección y conservación de las aguas nacionales en actividades de exploración y extracción de hidrocarburos en yacimientos no convencionales. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5495543&fecha=30/08/2017 el 28 de mayo de 2018.
- Sener (Secretaría de Energía) (2018a). Diagnóstico de la industria petrolera en México (Parte 2). Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/417437/Parte_2_vf.pdf el 24 de abril de 2019.
- Sener (Secretaría de Energía) (2018b). Infraestructura nacional de almacenamiento y transporte por ducto de petrolíferos. Dirección General de Petrolíferos, México. Recuperado de <https://www.google.com/maps/d/viewer?ll=24.13014952608291%2C-101.58201923537445&hl=es&z=6&mid=1QZRhLYTd8NwoPg8cb15Ea3r5jB05ABl2> el 24 de abril de 2019.
- Sener (Secretaría de Energía) (2018c). Plan Quinquenal del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural 2015-2019. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311763/531.DGGNP.209.18.INF.1.OT.12_Tercera_Revisi_n_PQ_2015-2019.pdf el 24 de abril de 2019.

- Smith, E. R. (2000). An Overview of EPA's Regional Vulnerability Assessment (ReVA) Program. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, 9-15.
- Smith, E. R., Mehaffey, M. H., O'Neill, R.V., Wade, T. G., Kilaru, J. V. y Tran, L. T. (2008). *Guidelines to Assessing Regional Vulnerabilities*. EUA: United States Environmental Protection Agency.
- Smith, E. R., Tran, L. T. y O'Neill, R. V. (2003). *Regional Vulnerability Assessment for the Mid-Atlantic Region: Evaluation of Integration Methods and Assessments Results*. EUA: United States Environmental Protection Agency.
- Smith, M, Paron P. y Griffiths, J. (2011). *Geomorphological mapping: Methods and applications*. Vol 15. Developments in Earth Surface Processes. Elsevier Science.
- Sommer, I., Oropeza, O. y Cram, S. (2010). Vulnerabilidad escenario compuesto. En S. Cram, I. Sommer, O. Oropeza y A. Mendoza (Coords.), *Atlas regional de impactos derivados de actividades petroleras en Coahuila de Zaragoza, Veracruz*. México: Instituto Nacional de Ecología-Semarnat-Instituto de Geografía-UNAM.
- Tambutti, M., Aldama, A., Sánchez, O., Medellín, R. y Soberón, J. (2002). La determinación del riesgo de extinción de especies silvestres en México. *Gaceta Ecológica*, 61, 10-21.
- Toledo, A. (1982). *Petróleo y ecodesarrollo en el sureste de México*. México: Centro de Ecodesarrollo.
- Torralba, F. (2013). Hacia una antropología de la vulnerabilidad. *Revista Forma*, 2, 25-32.
- Tricart, J. y Killian, J. (1979). *L'Eco-géographie et l'aménagement du milieu naturel*. París: FM-Herodote.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1998). *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. EPA/630/R-95/002F. Federal Register 63(93):26846-26924. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/eco_risk_assessment1998.pdf
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1999). Understanding Oil Spills and Oil Spill Response. Recuperado de <http://www.epa.gov/oilspills/pdfs> en octubre de 2014.
- Van der Ree, R., Jaeger, J. A. G., Van der Grift, E. A. y Clevenger, A. P. (2011). Effects of Roads and Traffic on Wildlife Populations and Landscape Function: Road Ecology is Moving Towards Larger Scales. *Ecology and Society* 16(1), 48.
- Vías, J. (2005). *Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España*. Tesis doctoral. Universidad de Málaga, España.
- Villa, F. y McLeod, H. (2002). Environmental Vulnerability Indicators for Environmental Planning and Decision-Making: Guidelines and Applications. *Environmental Management* 29(3), 335-348.

- White, G. F. y Myers, M. F. (Eds; 1994). Coping with the Flood: The Next Phase. *Special Journal Issue of Water Resources Update*, 95(Spring).
- Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. En A. Maskrey (Comp.), *Los desastres no son naturales*. Colombia: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina-Tercer Mundo Editores.
- Wilches-Chaux, G. (1998). *Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o yo voy a correr el riesgo: Guía de La Red para la gestión local del riesgo* [PDF]. Perú-Quito: La Red-ITDG.
- Yarham, R. (2011). *Cómo leer paisajes. Una guía para interpretar los grandes espacios abiertos*. España: Editorial H. Blume.
- Zinck, A. (2012). *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Enschede: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.

Parte II

- Banai-Kashani, R. (1989). A New Method for Site Suitability Analysis: The Analytic Hierarchy Process. *Environmental Management*, 13, 685-693.
- Coneval (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) (2011). Índice de rezago social 2010 a nivel municipal y por localidad. Recuperado de <http://www.coneval.gob.mx> el 19 de enero 2012.
- Cram, S., Sommer, I., Oropeza, O. y Mendoza-Cantú, A. (Coords.; 2010). *Atlas regional de impactos derivados de actividades petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz*. México: Instituto Nacional de Ecología-Semarnat-Instituto de Geografía-UNAM.
- Ching, F. (2015). *Arquitectura, forma, espacio y orden* (4a ed.). México: Editorial Gustavo Gili.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2014). Arc Gis, Arc Map (V10.2.2) [Software].
- González, J. L. (2013). *Implementación de la administración de integridad de ductos en México*. México: Grupo de Análisis e Integridad de Ductos-AI México.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2010a). *Carta Topográfica*. Hoja Poza Rica. Clave F14-12, escala 1:50 000. Inegi: México.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2010b). Censos Económicos 2009. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/default.asp?s=est&c=14220> en mayo de 2011.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad (ITER). Recuperado de <http://www.censo2010.org.mx/> en mayo de 2011.

- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2014). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/DENUE/Presentacion.aspx> en mayo de 2014.
- Lugo-Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorgológico*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Lugo-Hubp, J., Quesada, J. F. y García-Arizaga, M. T. (1989). Densidad de la disección. Morfometría I, escala de presentación: 1:8 000 000. En *atlas nacional de México* (sección naturaleza, clave IV.3.1).
- Ortiz-Pérez, M. A. (1998). Programa de actualización del ordenamiento ecológico general del territorio del país. Segunda fase: Diferenciación tipológica de las regiones ecológicas de México, en la modalidad de nivel 5, escala 1:250 000 (120 mapas). Dirección de normatividad ambiental. Departamento de Ordenamiento Ecológico. México: Instituto de Geografía-UNAM-Instituto Nacional de Ecología-Semarnat.
- Parrot P. y Ramírez, C. (2013). Módulo Multidim_V2 [Software]. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/Metodos_espacial/sof5.html
- Parrot, J. F. (2003). Módulo ejecutable Miel4_mx (Multi-directional interpolation applied to the image provided by the module). Instituto de Geografía, UNAM. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/catalogo_mde.php
- Parrot, J. F. (2005). Módulo ejecutable Brod4_Mx. Instituto de Geografía, UNAM. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/catalogo_mde.php
- Parrot, J. F. (2006a). Manual del software TLALOC (*Tridimensional Landscape Analysis. Local Operating Computation*). Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/parrot.php
- Parrot, J. F. (2006b). El software Indices_V2. Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE). México: Instituto de Geografía-UNAM. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/mini/sof_6.php
- Parrot, J. F. (2006c). El software TLALOC (*Tridimensional Landscape Analysis. Local Operating Computation*). Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/parrot.php
- Parrot, J. F. (2010). Módulo Binar_V2 [Software]. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/Metodos_espacial/sof1.html
- Parrot, J. F. (2011). El software Density_V2. Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE). México: Instituto de Geografía-UNAM. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/mini/sof_7.php
- Parrot, J. F. (2012b). Software DEMONIO (*Digital Elevation Models Obtained by Numerical Interpolating Operations*) y Manual. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/Metodos_espacial/parrot4.html

- Parrot, J. F. (2012c). Geosys_explor (módulo ejecutable Ms-Dos) [Software interno]. Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE). México: Instituto de Geografía-UNAM
- Parrot, J. F. (2012e). Módulo Net_curve2 [Software]. En *Digital Elevation Model of coastal and flood plains obtained from vector data: an adaptive method* (2015). Recuperado de https://www.igg.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/Metodos_espacial/eng/sof_8_4.html
- Parrot, J. F. y Ramírez-Núñez, C. (2012d). Geosys_fragm [módulo ejecutable interno]. Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE). México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Parrot, J.-F. (2012a). Módulo NewMiel_V2 (Multi-directional interpolation applied to the image provided by the module Brod4_M). Instituto de Geografía, UNAM. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/catalogo_mde.php
- Saaty, T. L. (1987). Rank Generation, Preservation, and Reversal in the Analytic Hierarchy Decision Process. *Decision Sciences*, 18, 157-177.
- Smith, E. R., Tran, L.T. y O'Neill, R.V. (2003). *Regional Vulnerability Assessment for the Mid-Atlantic Region: Evaluation of Integration Methods and Assessments Results*. EUA: Environmental Protection Agency.
- SPOT. (2011). Imagen satélite 2a (06/16/2011 10:48), 5 591-309, multispectral, cuatro bandas, resolución espacial de 10 m. CNES, 2011. México: ERMEXS-Instituto de Geografía-UNAM-SPOT IMAGE, S. A.
- SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto) (1983). *Carta geológica*, escala 1:250 000. Hojas: Poza Rica y Papantla. México: SPP.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1998). *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. Risk Assessment Forum. Office of Research and Development.
- Wilson, J. P. y Gallant, J. C. (2000). *Terrain Analysis. Principles and Applications*. Nueva York: John Willey & Sons.

Apéndice. Resumen de variables

	Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad	
Componente abiótico	Potencial de degradación	Con base en el mapa topográfico con curvas de nivel se lleva a cabo la caracterización de la estructura que conforma el relieve y su funcionamiento. Se identifican y delimitan las diferentes unidades de terreno dominantes y se designa su vulnerabilidad de acuerdo a su potencial de degradación.	Se cruzan los mapas de las unidades de terreno dominantes con mayor potencial de degradación y de geosistemas, y se determina la vulnerabilidad según el porcentaje de la superficie ocupada por la unidad de terreno con el mayor potencial de degradación en el geosistema.	Mayor vulnerabilidad de materiales de alto potencial de degradación (por ejemplo, laderas de montaña). Menor vulnerabilidad de materiales duros, masivos, firmes y cohesivos (por ejemplo, planicies con elevaciones menores).	
	Litología	Tipo de rocas	Con base en el mapa geológico se identifica el tipo de roca dominante y se designa su vulnerabilidad de acuerdo a su cohesión. Cada tipo de roca tiene una vulnerabilidad a intemperizarse de acuerdo a su composición, cohesión y dureza.	Se cruzan los mapas de litología y de geosistemas y se determina vulnerabilidad según la superficie dominante que ocupa un tipo de roca en el geosistema.	Mayor vulnerabilidad de materiales de baja cohesión (p. ej., sedimentos sueltos). Menor vulnerabilidad de materiales duros, masivos, firmes y cohesivos (p. ej., basalto, gneis).
	Morfometría	Densidad de disección	Longitud (km) de cauces fluviales (todos los órdenes) por unidad de superficie (1 000 x 1 000 m) calculando la moda por geosistema (valor más frecuente).	Obtención del MDE a partir de una capa primaria de INEGI (datos crudos) con el programa DEMONIO. Red fluvial de INEGI editada en pantalla. Calculo de la densidad de disección con el programa TLALOC. Cruce de capas de densidad de disección y geosistema con el programa Geosys_explor.	A mayor densidad de disección, mayor la vulnerabilidad intrínseca. Tomando como referencia los valores más altos y bajos del área de estudio.

	Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad	
Componente abiótico	Densidad de disección	Dominancia de las pendientes $> 18^\circ$	Obtención del MDE Cálculo de pendientes con el programa TLALOC Cruce de capas de pendientes y geosistema con el programa Geosys_Explor.	A mayor porcentaje de superficie ocupada por pendientes $> 18^\circ$ mayor vulnerabilidad intrínseca	
		Densidad de cabeceras	Obtención del MDE. Cálculo de la densidad de cabeceras con el programa TLALOC. Cruce de capas de densidad de cabeceras y geosistema con el programa Geosys_Explor.	A mayor densidad de cabeceras, mayor vulnerabilidad.	
	Morfografía	Forma y configuración de la ladera	Sobre un MDE sombreado y con curvas de nivel se identifican los límites de las laderas con delineación visual, y con apoyo de un mapa de pendientes se delimitan terrenos horizontales (no hay curvas de nivel) y terrenos escarpados (curvas de nivel muy cerradas). El perfil rectilíneo se identifica por curvas de nivel rectas y equidistantes.	Elaboración de un mapa geomorfológico e identificación de unidades de terreno. Identificación de tipo y formas de laderas con apoyo del MDE, curvas de nivel y pendientes. Valoración de las unidades de terreno por forma y configuración de la ladera.	Entre más escarpada y de contorno convergente es una ladera, mayor vulnerabilidad por la concentración de energía y materia; su conexión cuesta abajo, al contrario de las divergentes que separan, difunden y esparcen la materia y energía.
Componente biótico	Vegetación natural	Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)	De la imagen SPOT se obtiene el NDVI evaluando las bandas roja (3) e infrarroja (4).	Obtención del NDVI a partir de una imagen SPOT (de preferencia en época de lluvia) con el programa Índice_V2. Cruce de capas de NDVI y geosistemas con el programa Geosys_Explor.	A mayor NDVI, mayor vulnerabilidad, ya que indica cobertura con vegetación, que es una característica que se quiere proteger.

	Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad
Componente biótico Vegetación natural	Densidad de vegetación	De la imagen SPOT se seleccionan las bandas para calcular el NDVI y se estima el porcentaje de superficie ocupada por una densidad de vegetación >75%.	Se calcula con el programa Density_ V2.	A mayor densidad, mayor vulnerabilidad, ya que es una característica que se quiere proteger.
	Densidad de caminos	Longitud de todos los caminos (terracería y pavimentados) en km por unidad de superficie (1 000 x 1 000 m) por geosistema (valor más frecuente).	Red carretera del Inegi (editada en pantalla para limpiarla). Cálculo de la densidad de caminos con el programa TLALOC. Cruce de capas de densidad de caminos y geosistemas con el programa Geosys_ Explor.	A mayor densidad de caminos, mayor fragmentación del sistema y mayor vulnerabilidad.
Influencia antrópico	Fragmentación	Se calcula la fragmentación con base en el promedio de polígonos entre la superficie total por geosistema.	Mapa de geosistemas procesado con el programa Geosys_ fragm.	A mayor valor por geosistema, más fragmentación y más vulnerabilidad.
Componente socioeconómico Población	Índice de rezago social	Es una medida que en un solo índice agrega variables de educación, acceso a servicios de salud, servicios básicos en la vivienda, calidad y espacios en la misma, y activos en el hogar. Es decir, proporciona el resumen de cuatro carencias sociales según el Coneval.	El índice se obtiene aplicando la técnica estadística de componentes principales a partir de 11 indicadores. La fuente a consultar es el índice de rezago social del Coneval.	A mayor rezago social, mayor será la vulnerabilidad intrínseca de la población, ya que cuenta con menos recursos y oportunidades para reponerse de los efectos adversos de un derrame de petróleo que afecte su persona, sus actividades y sus bienes.

Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad
Componente socioeconómico Población	Población vulnerable	<p>Población de 5 años y más hablante de lenguas indígenas. Niños (<15 años) y ancianos (60 y más años).</p> <p>Porcentaje de población de 5 años y más hablante de lenguas indígenas respecto de la población total de 5 años y más. La fuente por consultar es el Censo de Población y Vivienda. Porcentaje de la suma de niños y ancianos respecto de la población total. La fuente a consultar es el Censo de Población y Vivienda.</p>	<p>A mayor porcentaje de población hablante de lenguas indígenas, mayor será la vulnerabilidad intrínseca de la población, ya que ésta se encuentra generalmente en condiciones más desfavorables para recuperarse de los efectos de algún derrame. A mayor porcentaje de niños y ancianos, mayor vulnerabilidad intrínseca de la población, pues ésta, por sus menores capacidades físicas, generalmente requiere de la asistencia de otras personas, tanto para adoptar medidas preventivas como para transportarse para escapar de una amenaza o recuperar su vida cotidiana tras un desastre.</p>
	Población dispersa	<p>Densidad de población dispersa por km².</p> <p>Suma de la población residente en localidades con menos de 15 000 habitantes entre superficie expresada en km². La fuente a consultar es el Censo de Población y Vivienda.</p>	<p>A menor densidad de población dispersa, mayor vulnerabilidad intrínseca de la población, pues ésta se asocia con menor capacidad de desplazamiento y accesibilidad, y consecuentemente, de evacuación o de recibir ayuda.</p>

Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad	
Componente socioeconómico Patrimonio	Viviendas con piso de tierra	Presencia de viviendas escasamente consolidadas.	Porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra respecto del total de viviendas particulares habitadas. La fuente a consultar es el Censo de Población y Vivienda.	A mayor porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra, mayor vulnerabilidad intrínseca de las viviendas y sus ocupantes, dada la posible debilidad estructural y constructiva de la vivienda y su relación con población con escasos recursos para recuperarse de un posible desastre
	Vivienda que no dispone de algún servicio	Presencia de viviendas con carencia de servicios.	Porcentaje de viviendas particulares habitadas que carecen de algún servicio (agua, electricidad o drenaje) respecto del total de viviendas particulares habitadas. La fuente a consultar es el Censo de Población y Vivienda.	A mayor porcentaje de viviendas particulares habitadas que carecen de algún servicio, mayor vulnerabilidad intrínseca de las viviendas y sus ocupantes, dado que este tipo de viviendas se relacionan con las escasamente consolidadas y con población con escasos recursos para recuperarse de un posible desastre
	Viviendas sin refrigerador	Presencia de viviendas que carecen de refrigerador. Este bien material de la vivienda se considera el más básico de los recopilados en los censos, pues se relaciona con una necesidad esencial: la preservación de alimentos.	Porcentaje de viviendas particulares habitadas que carecen refrigerador respecto del total de viviendas particulares habitadas. La fuente a consultar es el Censo de Población y Vivienda	A mayor porcentaje de viviendas particulares habitadas sin refrigerador, mayor vulnerabilidad intrínseca de las viviendas y sus ocupantes, dado que estas viviendas se relacionan con las escasamente consolidadas y con población con escasos recursos para recuperarse de un posible desastre.

Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad
<p>Componente socioeconómico</p> <p>Actividades económicas</p> <p>Densidad de empleo</p>	Densidad de empleos por hectárea.	<p>Calcular el total de empleos por geosistema a partir de los rangos de personal ocupado proporcionados por el DENU, o bien a partir de los datos de personal ocupado por localidad o AGEB urbano proporcionados por los Censos Económicos. Una vez hecho el cálculo de empleos, se divide entre la superficie del geosistema en hectáreas. Posibilidad de calcular el impacto económico a partir del valor catastral, de existir información para toda la zona de estudio.</p> <p>Las fuentes a consultar son el DENU o los Censos Económicos.</p>	A mayor densidad de empleos, mayor vulnerabilidad intrínseca, dado que la pérdida de empleo o su interrupción serían más graves.

Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad
Componente socioeconómico Infraestructura física	Infraestructura carretera	<p>Densidad de longitud (km) ponderada de infraestructura carretera por km² de superficie.</p> <p>El cálculo de la longitud de las vías carreteras por geosistema se realizará a partir del análisis en un SIG.</p> <p>Se sugiere ponderar las longitudes de cada carretera según sus características físicas (tipo de vía y número de carriles) y relevancia estratégica (rutas de evacuación, puentes, etcétera).</p> <p>Una vez hecha la ponderación, el resultado se divide entre la superficie del geosistema en hectáreas.</p> <p>La fuente a consultar es la cartografía topográfica 1:50 000 del Inegi, incluyendo las carreteras recientemente construidas o mejoradas (recientemente pavimentadas o con nuevos carriles) a partir de fotos aéreas/Google Earth.</p>	<p>A mayor densidad, mayor vulnerabilidad intrínseca, dado que la afectación de importantes vías de comunicación repercutiría, por un lado, en una menor posibilidad de evacuación y, por el otro, en menor asistencia a la población afectada.</p>
	Infraestructura de salud	<p>Densidad del número ponderado de establecimientos o unidades económicas del sector salud por hectárea (hospitales, clínicas, unidades médicas, etcétera).</p> <p>Se sugiere ponderar el número de establecimientos a fin de considerar su distinta importancia. Una posibilidad sería en función del número de trabajadores, lo que da idea de su tamaño y relevancia.</p> <p>Una vez hecha la ponderación, el resultado se divide entre la superficie del geosistema en hectáreas.</p> <p>La fuente a consultar es el DENUE, así como trabajo de campo.</p>	<p>A mayor densidad de establecimientos de salud, mayor vulnerabilidad intrínseca, dado el papel que éstos desempeñarían en la atención ante un desastre y/o derrame.</p>

Variable	¿Qué se mide y en qué unidades?	¿Cómo se mide?	Criterio de vulnerabilidad
Componente socioeconómico Infraestructura física Infraestructura de protección civil	Densidad del número ponderado de establecimientos o unidades económicas vinculados a la protección civil (bomberos, policía, albergues, etcétera).	Se sugiere ponderar el número de establecimientos a fin de considerar su distinta importancia. Una posibilidad sería en función del número de trabajadores, lo que da idea de su tamaño y relevancia. Una vez hecha la ponderación, el resultado se divide entre la superficie del geosistema en hectáreas. La fuente a consultar es el DENUE, así como trabajo de campo.	A mayor densidad de establecimientos vinculados a la protección civil, mayor vulnerabilidad intrínseca, dado el papel que éstos desempeñarían en la atención ante un desastre y/o derrame.
Vulnerabilidad extrínseca Variables espaciales Densidad de ductos	Densidad de ductos por geosistema en una superficie de 1 000 x 1 000 m (valor más frecuente).	Red de ductos de Pemex) (editada en pantalla para limpiarla). Cálculo de la densidad de ductos con el programa TLALOC.	A mayor densidad de ductos, mayor vulnerabilidad.
Densidad de pozos petroleros	Densidad de pozos petroleros por geosistema en una superficie de 1 000 x 1 000 m.		A mayor densidad de pozos, mayor vulnerabilidad.
Distancia a ductos	Valor más frecuente (moda) de la distancia entre la línea de ductos de Pemex y traza urbana, cauces fluviales, cuerpos de agua superficiales y caminos.	Se propone hacer el cálculo conjunto con población, ríos y caminos.	A menor distancia, mayor vulnerabilidad.

Vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos: una propuesta para su estimación, editado por el Instituto de Geografía, se terminó de imprimir el 21 de febrero de 2020, en los talleres de Dataprint, Georgia, 181, Nápoles, Benito Juárez, 03810, Cd. Mx.

El tiraje consta de 200 ejemplares impresos en digital sobre papel cultural de 90 gramos para interiores y couché de 250 gramos para los forros. Para la formación de galeras se usó la fuente tipográfica Adobe Garamond Pro, en 9.5/10, 10/12, 11/13 y 15/17 puntos. Edición realizada a cargo de la Sección Editorial del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Revisión y corrección de estilo: Lilia Carmina Villanueva Barrios. Coordinación de diseño y cuidado de la impresión: Laura Diana López Ascencio. Formación de galeras: Deyanira Ballesteros e Iván Cruz.

OTROS TÍTULOS DE LA SERIE

Geografía y pobreza. Nuevos enfoques de análisis espacial

Flor M. López
(*Coordinadora*)

Variabilidad climática en México a través de fuentes documentales (siglos XVI al XIX)

Gustavo G. Garza Merodio

Territorio, poder e identidad

Autonomías y estado plurinacional en Bolivia
Virginia Jabardo Pereda

Globalización, políticas neoliberales y transformaciones en la organización espacial de la economía mexicana a partir del decenio de 1980

María Teresa Sánchez-Salazar
María Teresa Gutiérrez de MacGregor
(*Coordinadoras*)

El océano como paisaje

Pageant of the Pacific: la serie de mapas murales de Miguel Covarrubias
Mónica Ramírez Bernal

Más allá de la emigración

Presencia de la población extranjera residente en México
Ana Melisa Pardo Montaña
Claudio Alberto Dávila Cervantes
(*Coordinadores*)

Migraciones internas en México

Miradas desde la geografía humana
Guillermo Castillo Ramírez
Coordinador

Vulnerabilidad intrínseca ante derrames de hidrocarburos: una propuesta para su estimación

Silke Cram Heydrich, Oralia Oropeza Orozco y Pilar Fernández Lomelín
Coordinadoras

La industria petrolera es de gran importancia para el desarrollo económico de México, no sólo por su valor estratégico para la economía nacional, sino también por la producción de bienes e insumos indispensables para garantizar la movilidad y permitir el desenvolvimiento adecuado de la sociedad. Sin embargo, sus actividades son también una fuente notable de contaminación que puede ocasionar daños significativos al ambiente y a la sociedad, debido a la naturaleza de su operación y a insuficiencias en los programas de mantenimiento, procedimientos y seguimiento riguroso de la disciplina operativa de la infraestructura petrolera, como el caso de la red de ductos y de las instalaciones para el manejo de la producción.

La red de ductos de la industria petrolera, distribuida a lo largo y ancho de nuestro país, está expuesta a factores naturales y humanos que ocasionan, de manera frecuente, fugas y derrames de hidrocarburos. Ante la incidencia de estos eventos y considerando que pueden constituir una amenaza para los ecosistemas, la salud de la población y las actividades económicas que se desarrollan en las zonas aledañas a las instalaciones petroleras, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México diseñaron una guía metodológica para identificar áreas ambientalmente sensibles o vulnerables a los derrames de hidrocarburos a partir de ductos. Este documento facilitará la comprensión de la vulnerabilidad intrínseca de los geosistemas con el fin de evaluar, prevenir y reducir el riesgo de desastres. Además, constituye una guía flexible que se adapta a las diferentes regiones de México que albergan infraestructura petrolera y es aplicable a otro tipo de amenazas.

978-607-30-2939-1



9 786073 029391