

Planeación y Sustentabilidad.

Realidades y desafíos
en áreas urbanas del
Noreste de México

Planeación y Sustentabilidad: Realidades y desafíos en áreas urbanas del Noreste de México / Elda Margarita Hernández Rejón, coordinadora.– Ciudad de México: Colofón; Universidad Autónoma de Tamaulipas, 2019.

113 páginas; ilustraciones; 17 x 23 centímetros

1. Urbanismo – México 2. Sustentabilidad – México

I. Hernández Rejón, Elda Margarita, coord., II. Manzur Verástegui, Dora, III. Treviño Hernández, Raúl, IV. Peña Alonso, Tomás Alejandro, V. Villalobos Escobar, Gina Paola

LC: **HD75.6 P52**

DEWEY: **333.7 P52**

Consejo de Publicaciones UAT

Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2948 • www.uat.edu.mx

Centro Universitario Victoria

Centro de Gestión del Conocimiento. Tercer Piso

Cd. Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149

consejopublicacionesuat@outlook.com



Fomento Editorial Una edición del Departamento de Fomento Editorial de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

D. R. © 2019 Universidad Autónoma de Tamaulipas

Matamoros SN, Zona Centro Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000

Edificio Administrativo, planta baja, CU Victoria

Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT

ISBN UAT: 978-607-8626-23-6

Colofón

Franz Hals núm. 130, Alfonso XIII

Delegación Álvaro Obregón C.P. 01460, Ciudad de México

www.paralex.com/colofonedicionesacademicas@gmail.com

ISBN: 978-607-8622-41-2

Publicación financiada con recurso PFCE 2017

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.

Impreso en México • *Printed in Mexico*

El tiraje consta de 300 ejemplares

Este libro fue dictaminado y aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT mediante un especialista en la materia. Asimismo fue recibido por el Comité Interno de Selección de Obras de Colofón Ediciones Académicas para su valoración en la sesión del primer semestre 2017, se sometió al sistema de dictaminación a “doble ciego” por especialistas en la materia, el resultado de ambos dictámenes fue positivo.

Planeación y Sustentabilidad.

Realidades y desafíos en áreas urbanas del Noreste de México

Elda Margarita Hernández Rejón
Coordinadora



UAT



Fomento
Editorial



COLOFÓN



Ing. José Andrés Suárez Fernández
PRESIDENTE

Dr. Julio Martínez Burnes
VICEPRESIDENTE

Dr. Héctor Manuel Cappello Y García
SECRETARIO TÉCNICO

C.P. Guillermo Mendoza Cavazos
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

Lic. Víctor Hugo Guerra García
VOCAL

Consejo Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodríguez** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marcano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dr. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta** • Universidad Nacional Autónoma de México

ÍNDICE

Presentación	9
I. Crecimiento urbano y la sustentabilidad del desarrollo Raúl Treviño Hernández y Elda M. Hernández Rejón	11
II. Sustentabilidad energética en México y los factores que la impactan Dora Manzur Verástegui y Raúl Treviño Hernández	31
III. Riesgo geológico y fenómenos asociados en áreas urbanas Tomás Peña Alonso	53
IV. Riesgo sísmico y fenómenos asociados en áreas urbanas Gina Paola Villalobos Escobar	91
Sobre los autores	111

PRESENTACIÓN

La expansión de las áreas urbanas y la transformación de los procesos socio-espaciales son fenómenos que al no planificarse y ordenarse generan diversas problemáticas urbano-ambientales y de sostenibilidad. Además de los desafíos actuales como la globalización y el cambio climático, que inciden en la transformación de las áreas urbanas.

En países como México, con desigualdades económicas, culturales, físicas y de desarrollo entre las regiones, existe la necesidad de fomentar y contribuir al interés por la investigación y la generación de conocimiento de los fenómenos urbano-ambientales; para la creación de propuestas de solución, así como de la formación de nuevas generaciones.

Respondiendo a esta necesidad, surge esta obra a iniciativa de un grupo de profesores investigadores de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, denominado: Planificación Territorial y Desarrollo Sustentable en áreas metropolitanas¹. El interés común de sus integrantes es el quehacer académico y científico en los problemas urbanos y medioambientales, relacionados con la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento que cultivan: Problemática Territorial y Sustentabilidad en áreas metropolitanas.

El libro Territorio y sustentabilidad, realidades y desafíos en áreas urbanas, surge básicamente por dos motivos: 1) profundizar en algunos temas que consideramos fundamentales en el ámbito del territorio y la sustentabilidad, y donde, sin embargo, existen vacíos, tanto en el desarrollo de estos temas en las ciudades y áreas metropolitanas, como en la producción de textos para los estudiantes de estas áreas del conocimiento; y 2) divulgar y difundir los trabajos de investigación que ha desarrollado el grupo, como uno de los objetivos primordiales de nuestro quehacer académico.

Este libro, plantea algunas de las problemáticas territoriales en México, y la necesidad de profundizar en la investigación, análisis y estudio sobre éstos, buscando entender la raíz de los problemas actuales, su particular desarrollo y evolución, y poder generar alternativas de solución sustentables para el territorio.

El libro se estructura en 5 capítulos, en los cuales se abordan los temas, que como investigadores consideramos retos actuales para la planificación del territorio;

¹ En 2009 se integra formalmente como Grupo Disciplinar, en 2013 lo dictaminan como Cuerpo Académico en Consolidación CA-UAT-89, y en 2017 obtiene el dictamen como Cuerpo Académico Consolidado.

los temas son: El crecimiento urbano y la sustentabilidad del desarrollo, los servicios públicos, la sustentabilidad energética, la sismología y la Geología.

Esperamos que esta selección de temas pueda servir como un estímulo para continuar en las investigaciones sobre los mismos, así como generar el debate y discusión para el desarrollo de nuevo conocimiento, así como de nuevas alternativas de solución a los retos en estos temas.

Dra. Elda Margarita Hernández Rejón
Líder del CA Planificación Territorial y
Desarrollo sustentable en áreas metropolitanas
Miembro del SNI-Conacyt Nivel 1

CAPÍTULO 1

El crecimiento urbano y la sustentabilidad del desarrollo



El crecimiento urbano y la sustentabilidad del desarrollo

Raúl Treviño Hernández
Elda M. Hernández Rejón

Introducción

Este primer capítulo presenta una reflexión del fenómeno de la urbanización, su evolución hacia la metropolización y la problemática medioambiental que ésta ha generado. Además se expone una revisión crítica de las distintas teorías que han abordado el estudio del entorno urbano con perspectiva ambiental, como la ecología urbana, higiene ambiental, así como las diversas definiciones que ha surgido buscando el mejor entendimiento y análisis del ambiente urbano, como la *ecocity*, *green city* y *greenway*. Lo anterior como antecedentes hacia la conceptualización más amplia de desarrollo sustentable o sostenible.

1.1. Urbanización en México y América Latina

El fenómeno de la urbanización a nivel global no ha sido de manera continua, sino por medio de “saltos cronológicos correspondientes a otras tantas mutaciones técnicas o económicas” (Véase SANTOS, M., 1973). La población mundial en 2005 alcanzó los 6 500 millones de personas de los cuales 3 177 millones vivían en zonas urbanas y la tendencia es que para el año 2030 la población supere los 8 000 millones de habitantes.

En la región de América Latina, el fenómeno de la urbanización surge en principio por la colonización, posteriormente evoluciona por las condiciones geográficas del continente (Hernández, 2010). En 1975, la población en la región latinoamericana llegó a 316 millones, alcanzando 512 millones para el año 2000 y de acuerdo a datos de la CEPAL (2015), se calcula alcanzará en 2025 los 680 millones y en 2050 los 779 millones (CEPAL, 2016).

En la tabla 1.1 se observa el crecimiento urbano en América Latina y el porcentaje por población urbana y rural, de 1970 al 2025.

En 1900, México contaba con 13.6 millones de habitantes, de los cuales 1.4 vivían en 33 ciudades y el resto lo hacía predominantemente en localidades pequeñas. Entre 1921 y 1930 hubo mayor dinamismo en algunas ciudades, Ciudad Juárez, Tampico (que pasó de 44 mil a 90 mil personas con una tasa de urbanización

del 8.6%), Monterrey y Ciudad de México, por ejemplo; y otras por el contrario, disminuyeron su población como, Durango, Colima y Guanajuato (Hernández, 2017).

Tabla 1.1. América Latina: Población total, urbana y rural y porcentaje de población (1970-2025, en miles a mitad de año)

Año	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Pob. total	313 314	352 540	392 786	433 386	473 190	512 681	551 630	589 716	626 148
Pob. urbana	191 575	229 328	266 426	305 905	346 299	388 476	429 261	468 571	505 851
Pob. rural	121 739	123 212	126 360	127 480	126 891	124 205	122 368	121 145	120 297
% Urbano	61.1	65.1	67.8	70.6	73.2	75.8	77.8	79.5	80.8
% rural	38.9	34.9	32.2	29.4	26.8	24.2	22.2	20.5	19.2

En 1940, México al igual que Latinoamérica, contaba con un perfil demográfico rural. Precisamente al final de la Segunda Guerra Mundial algunos países latinoamericanos (México, Argentina) van a abandonar el antiguo modelo demográfico y socioeconómico rural por un nuevo modelo de desarrollo económico basado en el crecimiento urbano e industrial desaforado (Dávila, 1998).

A partir de 1950 se acentúan en México los desequilibrios territoriales y urbanos. Este proceso tuvo como consecuencia un aumento del deterioro medioambiental y el incremento de las desigualdades regionales entre las zonas rurales marginadas del sur del país (Chiapas, Oaxaca) y zonas urbanas desarrolladas e industrializadas del Centro y Norte del país (Distrito Federal, Guanajuato, Nuevo León).

En 1960 había 124 ciudades, llegando a 174 en 1970. Entre 1970 y 2005 la tasa de población urbana pasó del 65.0 % al 77.8 %, mientras que la tasa de población rural se redujo a la mitad, pasando del 35.0 % al 22.2 %.

Hacia la década de 1980 surge una política Nacional, como estrategia para descongestionar el crecimiento de las grandes ciudades del país, e impulsar el crecimiento de ciudades medias, lo que aceleró el fenómeno de la metropolización. A principios del año 2000 la población total de México fue de 97.5 millones de habitantes, de los cuales 65.7 se concentraban en 350 ciudades. El grado de urbanización subió a 67.3 por ciento. Para el año 2010 la población total fue de 112.3 millones de personas, siendo la población urbana 86.3 %. (INEGI, 2010)

1.2. La planeación urbana y el fenómeno metropolitano

En México, el tema de la planeación urbana no es un hecho reciente, sino que ha estado vinculado a la historia y a las estructuras políticas, religiosas y socioeconómicas que predominaron. En este apartado nos centraremos en la evolución de la planeación urbana y los elementos claves en el desarrollo del fenómeno metropolitano.

En América Latina y principalmente en México, predominó la planificación del desarrollo global (Iracheta, 1997), caracterizada por destacar los aspectos económicos por encima de los espaciales y sociales. Sin embargo, la planeación global presenta ciertas carencias, sobre todo, en cuestiones relativas a la visión espacial y social (ordenación del territorio y medio ambiente).

Hacia la década de 1980 surge una política nacional, establecida en el Plan Nacional de Desarrollo 1976-1982 para impulsar el desarrollo de polos industriales, planeada como estrategia para desconcentrar el crecimiento industrial de las grandes urbes del país, como la zona metropolitana de la ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, hacia nuevos polos estratégicos de desarrollo. Se priorizaron principalmente ciudades medias y con condiciones geográficas favorables para su comunicación hacia otros puntos del país.

Las nuevas estrategias nacionales tuvieron profundos efectos al favorecer la concentración de población en algunos puntos del territorio: las ciudades. Lo anterior, generó un cambio en la dinámica de crecimiento que desplazó habitantes a otras ciudades de México, principalmente al Norte, hacia las ciudades fronterizas de Mexicali, Tijuana, Torreón y Ciudad Juárez, así como Hermosillo, Saltillo y Monterrey (Hernández, 2010).

Entre 1980 y 1990 la población alcanzó los 81.2 millones de habitantes, y el grado de urbanización creció a 63.4 %, consolidando el perfil urbano de México, lo que impactó en las condiciones de vida de la población urbana, el empleo, la seguridad, entre otros. En esa década continuó el acelerado crecimiento en las ciudades especializadas en manufacturas, ciudades de la frontera norte, ciudades portuarias y turísticas.

Las últimas décadas del siglo XIX estuvieron marcadas por el inicio de un desarrollo comercial en algunos puertos mexicanos (Veracruz, Tampico), y la presencia de la burguesía europea (francesa, holandesa) que dejará su impronta en el trazado urbano, las fachadas de edificios y el diseño de espacios públicos (plazas, parques, jardines) (Anon, 2005).

En el programa Nacional de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio 2006-2012 (SEDESOL, 2006), se propuso una política de ordenación que integraba todos los ámbitos espaciales y pretendió aprovechar todas las potencialidades de cada territorio.

Los resultados proponían alternativas e incidían en la necesidad de que el planeamiento urbano garantice el ordenamiento sostenible del crecimiento urbano a través de una eficaz vigilancia y actuación de las leyes y normas de planeación vigentes. Sin embargo, la insuficiencia de un ordenamiento de las ciudades continuó favoreciendo la pérdida progresiva de la calidad de vida urbana, en continua degradación de su habitabilidad y depredación del suelo.

El importante crecimiento urbano de México y Latinoamérica es el resultado de un proceso de transformaciones políticas, demográficas y socioeconómicas como: Una fuerte inmigración rural; Modificaciones en la distribución de usos y actividades socioeconómicas y residenciales en el suelo en la ciudad; Cambios funcionales y desequilibrios regionales; Permisividad pública y falta de iniciativa municipal.

En este contexto, el proceso de urbanización y creciente expansión se diversificó generando el crecimiento de las ciudades intermedias como reflejo de la pérdida demográfica progresiva de las grandes urbes, lo que ha provocado la aparición de las áreas metropolitanas y zonas conurbadas (López de Souza, 2001).

Se potenció el desarrollo de las zonas urbanas litorales, que reproduce el modelo demográfico nacional que posibilita el desarrollo desigual entre ciudades y medio rural costero. Este crecimiento urbano litoral se explica por factores socioeconómicos ligados al auge del turismo y, sobre todo, al incremento de proyectos de actividades específicas (industriales, petrolíferas) que no han generado un desarrollo regional sostenido. Así mismo, la dinámica de urbanización impactó en la configuración y expansión de las ciudades y zonas metropolitanas².

El fenómeno metropolitano se inició en México poco más de 70 años atrás en las ciudades de México, Monterrey, Torreón, Tampico y Orizaba; sin embargo no se contaba con información sistematizada que evidenciara su formación (Sobrino, 1993).

En el año 1960 se delimitaron por primera vez las zonas metropolitanas identificándose 12 zonas. Diversos investigadores identificaron posteriormente más zonas (Negrete y Salazar, 1986; Sobrino, 1993). Sin embargo, no fue hasta 2004 cuando SEDESOL, CONAPO e INEGI publicaron la *Delimitación de las zonas*

² La delimitación metropolitana, de acuerdo a SEDESOL, se considera: un área estadística que contenga al menos un núcleo central (Core Based Statistical Area, CBSA), con una población de más de 10 mil habitantes y que mantenga un alto grado de integración social y económica, medida a partir del número de desplazamientos con un territorio adyacente. Cuando dicha área tiene más de 50 mil habitantes se le reconoce como “área estadística metropolitana”. (SEDESOL, 2010)

metropolitanas de México, documento en el cual conjugaron criterios estadísticos y geográficos para la unificación del concepto.

En esa delimitación (2004) se identificaron 55 zonas metropolitanas, en 2007 se actualizó la delimitación y se obtuvieron 56 zonas metropolitanas. En 2010 se realizó la última actualización que a la fecha de hoy sigue vigente, la cual arroja un total de 59 zonas metropolitanas (SEDESOL, 2010).

En este contexto, la planificación urbana, en conjunto con la gestión territorial, son instrumentos necesarios para el ordenamiento sustentable del crecimiento y desarrollo metropolitano.

1.3. Urbanización y medio ambiente

Como ya se expuso en los párrafos anteriores, el mundo se ha ido urbanizando y la tendencia es que siga así; mayor urbanización y expansión de las ciudades y áreas metropolitanas, lo cual implica oportunidades y retos para atender. Los retos son mayores en aquellas áreas urbanas en las cuales no existió una previsión o planeación del crecimiento y de los efectos del mismo. En este sentido la primera consideración será entender a la ciudad como sistema disipador, como menciona Bettini;

[...] la expansión urbana y urbanismo significan una aceleración de los flujos de energía y un aumento del desorden que escapan a casi cualquier control. Dedicarse al problema de la ciudad como sistema disipador e intentar frenar las pérdidas más evidentes significa dedicarse a resolver el problema de la entropía³ (Bettini, 1998).

El mismo autor sostiene que es imposible la desaparición de la entropía, y que precisamente el objeto de la planificación urbana debería ser la reducción de la producción de entropía en exceso; Es decir, de la que aparece en un territorio además de la producida por la degradación de la energía solar. (Bettini, 1986). De acuerdo a lo anterior, se puede entender a la ciudad, a las zonas urbanas, como sistemas llenos de energía descontrolada, sin orden; lo cual nos lleva a entender que a mayor carga, mayor presión, mayor energía y mayor desorden. Retomando la

³ El mismo autor intenta explicar la *entropía*, con base en el segundo principio de la termodinámica, el cual mide el grado de dispersión de la energía. Es decir, la *entropía* es una medida del desorden o la cantidad de energía no disponible en un sistema. En este sentido, con respecto al modelo entrópico de la ciudad, señala que este modelo, acelera y se manifiesta en el deterioro, por ejemplo del decaer de las infraestructuras de transporte, de los acueductos, de las plantas de tratamiento de residuos, entre otros. (Bettini, 1998)

cuestión del problema urbano, Rubén Pesci (1998) señala los “males” que adolecen las ciudades latinoamericanas y menciona: hipercrecimiento, carencias de servicios, discontinuidad de gestión, control normativo escaso y estático, poca proyectualidad, inseguridad, entre otros.

Además de los problemas estructurales mencionados, es indiscutible que al crecer las zonas urbanas se produzcan otros problemas de tipo social, urbano, espacio funcionales y ambiental; los cuales han sido ampliamente estudiados por diversos autores como Harvey (1973), Castells (1978), Gilbert (1992), entre muchos otros. Algunos de estos problemas son: pobreza, desigualdad, marginalidad, desempleo, congestión vial, vivienda, ocupación irregular del suelo, acceso a servicios públicos, contaminación atmosférica, acústica, paisajística, contaminación por desechos urbanos e industriales, vulnerabilidad, gestión de los servicios públicos, entre otros.

Es necesario el estudio de los problemas de habitabilidad generados por el crecimiento urbano, reflexionar la afectación y el impacto para poder dar solución efectiva a los mismos, y además analizar los nuevos retos a los que se enfrentan las áreas urbanas.

1.4. Ecología urbana como antecedente a la Sustentabilidad del hábitat urbano

En 1798 Malthus, advirtió que el recurso de la tierra es finito, lo que significa, que los recursos que hay en ella, también lo son. El surgimiento del concepto de desarrollo sustentable⁴ significó un cambio en las diversas teorías sobre desarrollo y sobre la ecología.

Revisaremos algunas de las teorías más relevantes⁵ para el estudio del ambiente urbano, y que aportaron bases para la construcción del concepto de desarrollo sostenible o sustentable. La palabra *ecología* fue acuñada por Haeckel (1866) y la definió como la economía *de la naturaleza*, y se refiere a medir el flujo de materia y energía que atraviesa un territorio.

A partir de la **década de los setenta** se desarrolla un acercamiento a la cuestión ecológica en las ciudades (Laurie, 1979), más encaminada a la naturalidad, o hacia lo “verde“. Surge entonces el *ecologismo*, y es una época que se caracterizó

⁴ El desarrollo sustentable, también denominado sostenible, no obstante algunos autores como Quiroz y Tréllez (1992) han diferenciado los conceptos. En la presente tesis se consideran las dos expresiones sinónimos, por lo cual se pueden emplear de manera indistinta, aunque prevalecerá el término sustentable porque en México, país en donde se encuentra el área de estudio, el marco legal lo emplea.

⁵ De acuerdo a la opinión del autor.

por la presión que grupos civiles ejercieron sobre la administración pública con el objetivo de visualizar la problemática ambiental.

En 1977 se celebró la Conferencia de Educación Ambiental en Tibilisi, en donde se expusieron temas como la difusión de conocimientos y actitudes que permitieran la participación de los individuos en la protección y mejora del medio ambiente (Velázquez, 2006). Posterior a esa Conferencia, Bifani (1999) planteó con dos preguntas: *¿Son Medio Ambiente y desarrollo dos conceptos excluyentes? O bien ¿tiene que considerarse el Medio Ambiente como parte integral del desarrollo?* En esa misma época, surgen diversos grupos y asociaciones como la *Environmental Protection Agency* (EPA) o el grupo Greenpeace.

En la **década de los ochenta** surge el *ambientalismo*. Nieves (1998) señala que las circunstancias mundiales, intentaron apoyar una vigilancia del crecimiento económico abocado a la demanda de los recursos naturales y de sus consecuencias.

La ciudad es definida por Odum (1983) como un *ecosistema heterótrofo*, que a diferencia de un sistema heterótrofo natural, presenta una tasa metabólica más intensa por unidad de área, lo que requiere una mayor entrada de energía, y afirma textualmente: “Una ciudad, sólo puede ser considerada un ecosistema completo si se consideran completamente incluidos en él los ambientes de entrada y salida” (1983).

Los flujos de entrada y salida en una ciudad ya habían sido estudiados, por Wolman (1965), quien definió particularmente tres *inputs*: agua, alimentos y combustibles y tres *outputs*: aguas residuales, residuos sólidos y contaminantes atmosféricos. Además definió el concepto de *metabolismo urbano*.

La *urban ecology*, o *town ecology* ha sido estudiada bajo diversas perspectivas, al respecto Odum señala: “La ecología urbana es concebida como una ciencia social que revisa las interrelaciones entre personas y medio ambiente dentro de la trama ciudadana. Sin embargo, éste es un concepto demasiado restrictivo” (Odum (1983).

Sin embargo, no es hasta la **década de los noventa** cuando se empieza a tener una visión de la ciudad con base más ecológica, ambiental (Gordon, 1990). Es cuando resurge una visión más ecológica de la ciudad. Aparecen algunas definiciones en este sentido, como la de *ecocity*, *green city* y *greenway*.

Ecocity, alude a la problemática de la ciudad considerada como lugar de intercambios, no así de tránsito, bajo una perspectiva mumfordiana, significaría más calles para los peatones, más ciudad-jardín. (Bettini, 1998).

Green city, se refiere a una ciudad donde el ambiente urbano no se define necesariamente por los paisajistas sino por una profundización en los valores de naturalidad de los ecosistemas circundantes (Gordon, 1990). Otra definición surge en la obra de Hough (1994), quien señala que la *green city* consigue fundir urbanismo y naturaleza, ideas que han permanecido siempre separadas en compartimientos estancos.

Greenway, aborda la creación de una ciudad lineal que sería la prolongación de los centros existentes a lo largo de los principales ejes viarios de comunicaciones. Los sociólogos urbanos teorizaron la separación de las funciones en el ámbito urbano, según el cual dividía a las áreas por su especialización. Los sociólogos de Chicago comparaban a la ciudad con un organismo viviente y aseguraban que cuando la ciudad se desarrollaba de manera interna, se diferenciaban las funciones de las diversas zonas, de la misma forma en que en los humanos se diferencian los tejidos (Bettini, 1998).

Entre las épocas mencionadas se sostuvo una discusión teórica entre los ecologistas y los ambientalistas, pero que a decir del autor, Castells es quien clarifica la diferencia, señalando:

Por medio ambientalismo hago referencia a todas las formas de conducta colectiva, que en su discurso y práctica, aspiran a corregir las formas de relación destructivas entre la acción humana y su entorno natural, en oposición a la lógica estructural e institucional dominantes. Por “ecología “en mi planteamiento sociológico, entiendo una serie de creencias, teorías y proyectos que consideran a la humanidad un componente de un ecosistema más amplio y desean mantener el equilibrio del sistema en una perspectiva dinámica y evolucionista. En mi opinión, el medio ambientalismo es la ecología puesta en práctica... (Castells, 2002).

Con respecto a la higiene ambiental y su relación con el desarrollo urbano, la OMS⁶ redefinió algunos puntos que no clarificaron los sociólogos de la escuela de Chicago. Se incluyó un análisis de los factores sociales y culturales, que en un ambiente urbano limita la salud de las personas, como por ejemplo: pobreza, educación limitada, dieta inadecuada, así como otros factores económicos y de desarrollo urbano como: desempleo, dificultad de acceso a vivienda adecuada e infraestructura, economía estancada, industrialización no planificada, mala distribución de recursos y servicios, ineficaz gestión financiera y económica de la ciudad, entre otros (Who, 1991).

Además, se aborda la causalidad entre ciertas enfermedades y el ambiente urbano, sobre todo las relacionadas con la calidad del agua potable, el saneamiento de excrementos, evacuación de residuos, falta o ineficacia del drenaje, viviendas inadecuadas entre otras.

Alberto Ziparo (1995) señaló la falta de consideración ambiental en la práctica urbanística, y acentúa el hecho que la urbanística nació como respuesta al problema higiénico-sanitario de las ciudades post industriales.

⁶ Organización Mundial de la Salud

Giorgio Nebbia (1998), señala que en un ecosistema urbano tanto las actividades productivas y las de consumo transforman los bienes -ambientales y económicos- en residuos y desechos, es decir en “bienes negativos”. Específicamente sobre los residuos y desechos, menciona que antes de regresar al ambiente exterior, ocasionan efectos negativos en la salud de los habitantes de la ciudad. Sin embargo, también señala que los residuos y desechos pueden considerarse como una actividad productiva, cuando éstos alimentan alguna actividad, en el interior de la ciudad.

En los ecosistemas naturales los residuos y desechos servirían de nuevo como material de entrada; sin embargo, en los ecosistemas urbanos es más complejo, ya que se metaboliza y reelaboran los materiales que son ajenos a la vida al interior, es decir artificiales.

Por lo cual, los residuos deben ser sacados con procesos técnicos y los desechos finales son muy diferentes a lo que ingresó en un principio. Entonces, la producción de desechos en el interior de la ciudad está acompañada de efectos ambientales negativos, contaminación, mala calidad ambiental.

De acuerdo a lo descrito, los conceptos de ecosistema urbano y de ecología urbana fueron la base de mecanismos e instrumentos a nivel urbano para una aproximación mucho más amplia e integradora a la gestión de la ciudad.

1.5. El concepto de Desarrollo sustentable

A raíz de la revolución industrial empezaron a surgir dos principales fuerzas motrices de desarrollo, por un lado, el crecimiento económico, basado en el consumo masificado y, por el otro, el crecimiento demográfico (Olabe, 2016).

El científico Paul Ehrlich (1968) alertó a organismos internacionales y gobiernos que la explosión demográfica era una de las claves causantes de la degradación ambiental y, que sin una desaceleración de la misma, sería muy difícil preservar los sistemas naturales que sostienen las funciones de la biósfera.

Fue a partir de los años setenta, cuando se empieza a desarrollar un acercamiento al problema ecológico de las ciudades, que se basó en la observación de los parámetros ambientales y la protección de áreas verdes (Laurie, 1979).

El concepto que surgió precisamente para que el desarrollo proteja, cuide y preserve el planeta es el de desarrollo sostenible o sustentable. En este apartado se abordan de manera breve los antecedentes al mismo.

En la década de los setenta se lleva a cabo la primera reunión sobre medio ambiente, que sirvió como base para el lanzamiento del PNUMA, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, cuyo objetivo fue impulsar los debates sobre el medioambiente. Esta reunión se realizó en Estocolmo (Suecia 1972) y funcionó como el inicio de los planes que han evolucionado hasta llegar a

convertirse en puntos de reunión de la sociedad y organizaciones e investigadores.

Debido a la creciente necesidad de conocer los límites del desarrollo y crecimiento económico y a la par de esta importante reunión se desarrolla un informe que se denomina *Meadows*, cuyo nombre oficial fue *The Limits to Growth* (Meadows, 1972).

El Informe Meadows estudiaba, a través de un complejo modelo computacional construido a partir de una gran base de datos, el futuro del planeta, centrándose en las interrelaciones entre variables como el nivel de población, la oferta de alimentos, la evolución de la contaminación o los diferentes usos y características de los recursos disponibles.

La predicción que hace dicho informe en cuanto al límite del desarrollo físico de la Tierra, establecido, en menos de cien años, obliga al planteamiento, a partir de entonces, de nuevas estrategias para el desarrollo, apoyándose en las potencialidades disponibles por los ecosistemas existentes y en las tecnologías apropiadas bajo un enfoque de *sostenibilidad ecológica del desarrollo económico* (ecosostenibilidad).

Si bien es cierto que este informe fue de las primeras aportaciones técnicas de la era moderna y que, además, tuvo mucho impacto en la investigación de esa época, también la revista *The Ecologist*, editada por E. Goldsmith, abordó algunos temas interesantes acerca del crecimiento y desarrollo económico con una perspectiva diferente basada en el anticrecimiento (Goldsmith, 1972)⁷.

El concepto *desarrollo sostenible* surgió a raíz del Informe Brundtland, que data de 1987, más de una década después de la publicación de *Los límites al crecimiento* de Meadows. En 1987 la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas define por vez primera de forma explícita en el Informe Brundtland, emitido bajo el título de *Our common future* (1987), de acuerdo a esto, el desarrollo sostenible es: “El desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para asumir sus propias necesidades”.

En el informe se plantea la importancia que tiene para la sostenibilidad los conceptos de necesidades y limitaciones. Con respecto al concepto de necesidades, éste se refiere fundamentalmente a satisfacer las necesidades de los seres humanos de la tierra dando prioridad a la de los habitantes de los países pobres. Con respecto al concepto de limitaciones, éste debe entenderse sobre la base de las restricciones que impone el estado de la tecnología disponible, el estado de la organización social existente y, sobre todo, la capacidad del medio ambiente y de los recursos naturales para atender a las necesidades presentes y futuras de población (Aguilera, 2000).

Una de las implicaciones de mayor interés del Informe Brundtland es que pone de manifiesto la necesidad de que, tanto a nivel global como a nivel local,

⁷ Anderson (1992), aporta una crítica interesante sobre el debate del crecimiento económico.

se diseñen las estrategias que permitan a los países y regiones compatibilizar el crecimiento y desarrollo económico con el desarrollo y estabilidad sociales y con la conservación del medio ambiente físico. Con esa finalidad, se enumera una serie de estrategias concretas dirigidas a los siguientes objetivos básicos:

- a) Revisar el modelo actual de crecimiento económico
- b) Asumir las necesidades básicas de todos los habitantes del planeta.
- c) Asegurar un nivel sostenible de crecimiento de la población.
- d) Conservar y aumentar los recursos naturales básicos.
- e) Compatibilizar el medio ambiente y la economía en los procesos de toma de Decisiones públicas y privadas (Hernández, 2007)

El concepto de desarrollo sustentable es entonces un pilar fundamental para el desarrollo, sin embargo, la preocupación por las condiciones de deterioro ecológico, será acompañada además por otras reflexiones como el aumento de la pobreza y el hambre, salud, aumento del analfabetismo, entre otras.

Sobre este concepto de Desarrollo sostenible o sustentable, Biffani, señala:

Este enfoque del desarrollo sostenible proporciona dos puntos de vista importantes. Uno enfatiza los límites ecológicos y la imposibilidad de crecimiento continuo en un planeta finito. El otro resalta la solidaridad con las generaciones futuras y, por lo tanto, la necesidad de preservar los recursos naturales y ambientales de modo que dichas generaciones dispongan de un máximo de opciones para maximizar su bienestar moral de salvaguardar el capital natural para las futuras generaciones. A menudo se complementa con la preocupación por los límites naturales (Bifani, 1990)

Bermejo expone alguna falta de claridad con respecto a su ejecución:

[...] no nos da referencias para garantizar que las generaciones futuras tengan el mismo bienestar que la actual. Habría que establecer en primer lugar cuáles son las necesidades mínimas que deben ser satisfechas por todos. Si no tenemos una idea clara al respecto, resulta imposible determinar el patrimonio natural que debemos legar a la siguiente generación (Bermejo, 2001)

Posterior a la formación de ese “nuevo concepto”, llamado desarrollo sustentable, diferentes autores han desarrollado definiciones basadas en esa idea, como la que señala Quadri G (1994).

[...] el desarrollo sustentable implica no comprometer el medio físico o ambiente, de tal forma que se transmita a las generaciones futuras un acervo de capital ecológico igual o superior al que ha tenido en disponibilidad la población actual...

De acuerdo con las metas a corto y mediano plazo fijados en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD-92), realizada en 1992 en Río de Janeiro, para el año 2000 los países en desarrollo tendrán que haber establecido las capacidades para monitorear las cuatro áreas temáticas mencionadas anteriormente y para establecer programas nacionales con metas propias para cada una de ellas.

Ciudades y regiones han aprobado las estrategias de desarrollo sostenible a partir de la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro (1992), sin embargo, a pesar de que ha habido avances, es importante que los países establezcan el desarrollo sustentable como meta a lograr; Aunque esto no ocurre la mayoría de las veces en los países de América Latina; por ejemplo en el caso de México, la problemática medioambiental generada por el modelo de desarrollo centrado en el elemento económico, todavía es un reto a resolver.

Con base en lo anterior, y retomando lo que señala Ander-Egg (1978), sobre que la planificación del desarrollo es un instrumento que ayuda a prever la construcción del futuro y, por tanto, el crecimiento de la ciudad debe ser planeado para otorgarles a sus habitantes calidad de vida; además debe ser un desarrollo que integre los elementos endógenos y exógenos del entorno para minimizar los problemas urbanos, al no existir estos elementos, es cuando se genera la insustentabilidad urbana (Hernández, 2010).

1.6. Sustentabilidad urbana

En la práctica, los conceptos y teorías sobre el desarrollo sustentable han tenido implicaciones diversas, no solo a nivel geográfico, es decir, para un país, región, ciudad o localidad urbana; si no también por los distintos desafíos correspondientes a las diversas áreas de aplicación de la misma.

El programa Agenda 21, indicó los requisitos prácticos para el desarrollo sustentable en áreas urbanas, a nivel sectorial, por ejemplo, tratamiento de agua, aire limpio, gestión de residuos sólidos, transporte, entre otros.

El asunto de la sustentabilidad urbana ha sido uno de los más urgentes en las agendas internacionales, porque las ciudades siguen creciendo demográficamente y expandiendo sus límites.

Este aparente desarrollo ha generado una serie de problemas en el territorio, problemáticas no sólo espaciales, sino también socio económicos, ambientales y urbanos, que desequilibran la capacidad del sistema urbano.

El concepto de Desarrollo urbano sustentable o sustentabilidad urbana, significa, de acuerdo a López y otros autores (2004):

[...] un planteamiento y puesta en práctica de un proceso urbano territorial que integre los diversos procesos que concurren en la conformación y

transformación del territorio metropolitano: productivos, ambientales, socioculturales, políticos y tecnológicos, con la finalidad de generar una nueva racionalidad en el manejo de los recursos materiales, naturales y sociales de tal manera que el metabolismo urbano (intercambio de materia, energía e información) tienda a equilibrarse para no provocar la incertidumbre acerca de la satisfacción de las necesidades futuras y que se expresen en la calidad de vida de la población“. (López, et al., 2004).

En este contexto, la sustentabilidad urbana debería atender la relación del desarrollo urbano y los costos ambientales que genera, logrando una disminución en el uso de los recursos, como agua y energía; es decir, no hacer uso de los recursos por encima de los límites, así como no emitir residuos por encima de la capacidad de depuración.

La sustentabilidad urbana debe considerar además, el marco local y regional que tiene cada región. Así como en la planeación urbana estratégica, que se basa en la identificación de los problemas prioritarios, y de datos que sustenten y evidencien la situación específica.

Indudablemente, no se puede hacer mención de la problemática urbana sin tomar en cuenta el tema del abastecimiento y gestión de algunos servicios básicos para el eficiente y correcto funcionamiento de las ciudades.

1.7. Reflexiones del capítulo

El acelerado crecimiento urbano de los países latinoamericanos, entre ellos México, ha generado diversos efectos sociales, ecológicos y ambientales, lo que lleva al replanteamiento de las soluciones hasta ahora desarrolladas.

En las zonas urbanas, el capital ecológico, es decir los recursos ambientales y territoriales, deberían manejarse adecuadamente, bajo los criterios de sustentabilidad, de tal forma que no se transgredan los umbrales críticos, después de los cuales se generan costos sociales y ambientales excesivos (Miller, 2002).

En México, la urbanización es acelerada, y sigue un modelo de desarrollo económico desaforado y consumista; además los impactos generados por el fenómeno urbano, implican la expansión no planificada de las áreas urbanas, un aumento de los desequilibrios territoriales, un incremento de las desigualdades sociales, el aumento de los requerimientos de insumos para su funcionamiento, particularmente el aprovisionamiento del agua y energía; así como su evacuación.

Además, existen otras consecuencias de tipo ambiental, como la contaminación del aire, suelo, paisajística y de mayor generación de residuos sólidos tanto urbanos como industriales, así como la disposición y tratamiento inadecuado

de los residuos a lo largo del territorio, lo que ha afectado y continúa impactando directa o indirectamente a la salud de la población y al medio ambiente.

Lograr el objetivo de la sustentabilidad urbana, requiere en principio, reconocer los principales problemas urbano-ambientales y socio-espaciales a atender, además lograr un planeamiento urbano estratégico, y contar con un marco legal que regule el orden urbano.

Lista de referencias

- ANDER-EGG, E. (1978): Formas de alineación en la sociedad burguesa. Alicante, Emil. España.
- ANON, G. (2005): México, Neoclassical City: the Spaces and Ideas of an Urban City Planning (1783-1911) en *Urban Morphology* 9 (2): oct 2005, pp. 145-154.
- BERMEJO, R. (2001): Economía Sostenible. Principios, conceptos e instrumentos. Colección Serie General, 8. Ed. Bakeaz. Bilbao, España. Pag. 376.
- BETTINI, V. (1986): *Elementi di Analisi Ambientale per Urbanisti*, Clup, Milano.
- _____ (1998): *Elementos de Ecología urbana*. Editorial Trotta, serie medio ambiente. España.
- BIFANI, P. (1999): *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Instituto de Estudios Políticos para América Latina y Africa (IEPALA) y UAM Ediciones. 4ta. Edición.
- BRUNTLAND, G.H. (1987): *Informe de la comisión mundial sobre el medio ambiente y el desarrollo (Comisión Brundtland): Nuestro futuro común*. Comisión Brundtland. New York. [Consultado el 6 de septiembre 2016]. Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/105305734/ONU-Informe-Brundtland-Ago-1987-Informe-de-la-Comision-Mundial-sobre-Medio-Ambiente-y-Desarrollo>
- CASTELLS, M. (1978), *La cuestión urbana*. Siglo XXI editores, México DF.
- _____ (2002): *La sociología urbana*. Alianza editorial. España.
- CEPAL, Comisión Económica para América Latina y El Caribe (2016): Sitio web de noticias, Consultado el 11 de enero 2017, en: <http://www.cepal.org/es/noticias/la-poblacion-america-latina-alcanzara-625-millones-personas-2016-segun-estimaciones-la>
- DÁVILA, J. (1998): El Estado Del Medio Ambiente En Las Ciudades Latinoamericanas, *Estudios Demográficos y Urbanos* Vol.3, No. 1, Enero-Abril, Pp. 49-78.
- EHRlich, P. (1968): *Population, Resources, Environment*, Freeman, San Francisco.
- GILBERT, A. y Gugler, J. (1992): *Cities, Poverty and Development, Urbanization in the Third World*. Oxford University Press, Oxford.
- GOLDSMITH, E. (1972): *Blueprint for Survival*. Universidad de Michigan.
- GORDON, D. (1990): *Green Cities. Ecological Sound Approaches to Urban Space*. Black Rose Books, Montreaux.
- HAECKEL, E. (1866): *Gennerelle Morphologie der Organismen*, Reimer, Berlin. Citado por: Nebia G (1998): *Historia Natural de los bienes en el ecosistema urbano*.
- HARVEY, D. (1973): *Social Justice and the City*. Baltimore: John Hopkins University Press.
- HERNÁNDEZ, E. (2010): *El problema de la vivienda marginal en México. El caso de los asentamientos humanos periféricos en el Sur de Tamaulipas, México*. Tesis doctoral dirigida por Joseph Oliveras i Samitier. Universitat de Barcelona. España.

- HERNANDEZ-REJÓN, E. (2017): Desarrollo y calidad de vida urbana en el Estado de Tamaulipas, en González, M.E. (coord.) *Desarrollo Sustentable y Calidad de Vida: Retos para el Norte de México*, El Colegio de la Frontera Norte.
- HOUGH, M. (1994): *Cities and Natural Process*. Routledge, New York.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2010): *Censos de Población y Vivienda 2000 y 2010*. [Consultado el 6 de agosto de 2016] Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/default.aspx>
- IRACHETA, A.X. (1997): *Planeación y desarrollo: una visión del futuro*. Plaza y Valdés Editores, México, p. 176.
- LAURIE, I. (1979): *Nature in the Cities. The Natural Environment in the Design and Development of Urban Green Space*, Wile, New York.
- LÓPEZ, R. et al (2004): *La sustentabilidad en la planeación urbana y regional en México*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.
- LÓPEZ DE SOUZA, M. (2001): Metropolitan Des-concentration, Socio-political, Fragmentation and Extended Suburbanisation: Brazilian Urbanisation in the 1980's and 1990's. *Geoforum*, 32, pp. 437-447.
- MEADOWS, D. et al. (1972): *The Limits to Growth*, Pan, Londres.
- NEBBIA, G. (1998): Historia natural de los bienes en el ecosistema urbana. Pp 215-231. En: Bettini V (1998): *Elementos de ecología urbana*, serie medio ambiente, ed. Trotta. España.
- NEGRETE, M. Ha. Y SALAZAR, H. (1986): Zonas metropolitanas en México, 1980, Estudios Demográficos y Urbanos, vol. 1, núm. 1, pp. 97-124.
- NIEVES, M. (1998): Género, Medio Ambiente y Sustentabilidad del Desarrollo en *Serie Mujer y Desarrollo*. Unidad Mujer y Desarrollo. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas. Santiago de Chile.
- ODUM, E. (1983): *Basic Ecology*. Cbs, College Publishing, Saunders, Philadelphia.
- OLABE, A. (2016): *Crisis Climática-ambiental*. Galaxia Gutenberg. España.
- PESCI, R. (1998): Desarrollo sostenible en ciudades intermedias. Testimonios en América Latina. En Cepal 2002, *Las Nuevas Funciones Urbanas: Gestión para la ciudad sostenible*, Serie Medio Ambiente y desarrollo 48, Santiago de Chile. pp. 49-70.
- QUADRI, G. (1994): Sustentabilidad urbana y desigualdad; argumentos de política pública. En Moncayo, P y J. Woldenberg (Coord). *Desarrollo, desigualdad y medio ambiente*. México. Ed Cal y Arena.
- SANTOS, M. (1973): *Geografía y economía urbana en los países desarrollados*, p. 44.
- SEDESOL, Secretaría de desarrollo social, CONAPO, Consejo nacional de población e INEGI, Instituto nacional de estadística y geografía, (2010): *Delimitación de las zonas Metropolitanas de México, 2010*, México.

- SEDESOL, Secretaría de desarrollo social, CONAPO, Consejo nacional de población e INEGI, Instituto nacional de estadística y geografía, (2006): *Delimitación de las zonas Metropolitanas de México, 2005*, México.
- SOBRINO, J. (1993): *Gobierno y administración metropolitana y regional*, México, Instituto Nacional de Administración Pública, A. C.
- VELÁZQUEZ, A.C. (2006): *Gestión ambiental y tratamiento de residuos sólidos urbanos. Propuesta para la Zona Metropolitana de Guadalajara a partir de las experiencias de la Unión Europea*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
- WOLMAN, A. (1965): The Metabolism of Cities. *Scientific American CCXIII*, 178-190.
- WHO (1991): *Report of a WHO Expert Committee, Environmental Health in Urban Development*, Geneva.
- ZIPARO A. (1995): Alla Ricerca delle Città Sostenibili, *Il Manifesto*, 17 enero.



CAPÍTULO 2

La sustentabilidad
energética en México
y los factores que la
impactan



La sustentabilidad energética en México y los factores que la impactan

Dora Manzur Verástegui
Raúl Treviño Hernández

Introducción

Como ejemplo mundial de sustentabilidad se tiene a Costa Rica, que es un país que se ha caracterizado por el cuidado al medio ambiente y ahora se propone ser el primer país que use sólo fuentes renovables para la generación de la energía que requiere. En seguida se presenta una síntesis de factores relevantes, que impactarán directamente la sustentabilidad energética en México y en especial la zona metropolitana o sur del estado de Tamaulipas. Los tópicos que se tratan son:

1. Conceptos: Sustentabilidad o Desarrollo Sustentable y Energía.
2. Energía en México y su Legislación.
3. Impacto Ambiental en la obtención de energéticos.
4. Sustentabilidad Energética en la república mexicana y el estado actual de la sustentabilidad en la zona metropolitana o sur del estado de Tamaulipas.

2.1. Sustentabilidad o Desarrollo Sustentable y Energía (Conceptos)

Los hidrocarburos son nuestra principal fuente de energía. La energía que consumimos proviene de distintas fuentes, pero no todas tienen la misma relevancia. Tanto en nuestro país como en el mundo, las fuentes de energía más importantes son los combustibles fósiles que en conjunto aportan casi el 90% de la energía que utilizamos. La forma de representar la participación de cada fuente de energía es a partir de la matriz energética.

Desarrollo Sustentable: (DS), su definición se asumió en el Principio 3° de la Declaración de Río, (1992). En la Conferencia de Río se establece “oficialmente” que lo sostenible o sustentable no se refiere exclusivamente al componente medioambiental de las cosas, sino que había que estudiar del mismo modo las cuestiones sociales y económicas, para conocer en qué forma interaccionan estas variables.

La mayoría de los investigadores en Ecología, en México, aceptan que el desarrollo sostenible o desarrollo sustentable son sinónimos, y que ambos términos pueden usarse cuando se refiere a un proceso que puede mantenerse sin afectar a la

generación actual o futura, intentando que el mismo sea perdurable en el tiempo sin agotar los recursos actuales, buscando cubrir las necesidades actuales, pero siempre teniendo en mente que las generaciones futuras puedan también cubrir las suya de acuerdo a la (LGEEPA).

Para el presente estudio se usarán los dos términos con el mismo concepto. La práctica del desarrollo sustentable o sostenible tiene un fundamento humanista con valores y principios éticos. La ética global para un mundo sostenible o sustentable, fue desarrollada a partir de un proceso participativo y global, por un período de 10 años, iniciado en la Cumbre de Río 92, y el cual culminó en el año 2000. Ver figura 1, con pilares de la sustentabilidad.



Fuente: Diseño propia, con base en los pilares de la (CGLU).

2.2. Objetivo del desarrollo energético sustentable (DES)

Su objetivo, es definir proyectos viables y armonizar los aspectos económico, social, y ambiental de las actividades humanas, con los tres pilares del desarrollo sustentable, apoyando la producción de energía limpia y renovable, con tecnologías más eficientes, tomando en cuenta la cultura de las comunidades. Sus objetivos específicos son:

- Sustentabilidad económica: se da cuando la actividad que se mueve hacia la sostenibilidad ambiental y social es financieramente posible y rentable.
- Sustentabilidad social: basada en el mantenimiento de la cohesión social y de su habilidad para trabajar en la persecución de objetivos comunes.
- Sustentabilidad ambiental: compatibilidad entre el proceso de la producción energética con la preservación de la biodiversidad y de los

ecosistemas y la cultura, ya que la Organización Mundial de la Ciudades (CGLU) en el 2010, la aprobó como el cuarto pilar del DS. En seguida de exponen los objetivos.

Tabla 2.1. Los ODS 7 y sus metas específicas para 2030. Estructura propia, con base en Crónica ONU, 2015

ODS	Metas específicas
1	Garantizar el acceso universal a servicios de energía confiables y modernos
2	Aumentar sustancialmente el % de la energía renovable como fuentes de energía
3	Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética
4	Aumentar la cooperación internacional a fin de facilitar el acceso a la investigación y las tecnologías energéticas no contaminantes, incluidas las fuentes de energía renovables; Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo
5	Reconoce que el reto de cambiar a sistemas energéticos más sostenibles como necesidad mundial y no como problema del Norte o del Sur; reconoce tanto el mayor uso de la energía renovable como mejorar la eficiencia en el uso de energía basada en combustibles fósiles es importante y no se excluyen
6	Refleja el hecho de que habrá diferentes soluciones para los distintos países; Pone de relieve que es el acceso a los servicios proporcionados por la energía lo que es esencial para el desarrollo y no la energía en sí misma
7	Garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos; Aumentar el porcentaje de la energía renovable como fuentes de energía; Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética; Aumentar la cooperación internacional facilitando el acceso a la investigación y a tecnologías energéticas no contaminantes y renovables

Fuente: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el desarrollo energético sostenible en América Latina y el Caribe (Crónica ONU, 2015)

Agenda 2030. Objetivos para el desarrollo sustentable (ODS)

En septiembre de 2015 se llevó a cabo la Cumbre para el Desarrollo Sostenible en la ciudad de Nueva York, en la que los 193 estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluye un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para alcanzar tres objetivos: poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, además de hacer frente al cambio climático.

Tabla 2.2. Los ODS acordados. Fuente: ONU. Cumbre para el Desarrollo

ODS	Descripción
1	Poner fin a la pobreza
2	Hambre Cero
3	Buena salud
4	Educación de calidad
5	Igualdad de género
6	Agua limpia y saneamiento
7	Energía asequible y sostenible
8	Trabajo decente y crecimiento económico
9	Industria, innovación, infraestructura
10	Reducir inequidades
11	Ciudades y comunidades sostenibles
12	Consumo responsable y producción
13	Acción climática
14	Vida marina
15	Vida en la tierra
16	Paz, justicia e instituciones fuertes
17	Alianzas para los objetivos

Fuente: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el desarrollo energético sostenible en América latina y el caribe (Crónica ONU, 2015)

Es importante mencionar que el Objetivo 7. Energía asequible y sostenible. Se considera la pertinencia de coordinar acciones de promoción con dependencias federales y estatales para tener un desarrollo energético con principios de sustentabilidad, así como promover el establecimiento de parques de generación de energía eólica o solar en regiones con potencial y esquemas de cogeneración de energía.

La definición común y global en la bibliografía revisada es, que la energía es la capacidad que tiene la materia de obrar, producir trabajo en forma de movimiento y podrá transformarse en cualquiera de sus manifestaciones, como en: eléctrica, luminosa, mecánica, térmica etc.

2.3. Generación de Energía en México. México en camino a ser un país sustentable (Abitec Eco Energy 2017)

México ha apostado fuertemente por la transición hacia una mayor sustentabilidad y prueba de esto son algunos datos y cifras: Hasta septiembre de 2016, el país contaba con 253 centrales para la generación de energía eléctrica, a través de fuentes renovables, incluyendo a las que están en operación y en construcción. Cada vez hay más estados con plantas de energía que utilizan fuentes renovables como Oaxaca, donde se promueve la energía eólica, y Veracruz, donde la biomasa ha ganado mucho terreno. Se estima que para el año 2026, la capacidad de generación eléctrica a través de energías renovables en México, será de un 58.6%. Esto en comparación con los datos de los 23% de energía eléctrica sustentable correspondientes al año 2012, de acuerdo a datos la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la CFE.

Las regiones que tienen mayor potencial de convertirse en zonas sustentables corresponden al noreste de México (Tamaulipas) y la península de Yucatán, pues se perfilan como los terrenos donde mayor irradiación existe y donde es posible instalar sistemas de energía solar. En Oaxaca, Baja California y Puebla se planea un crecimiento notable en campos de energía eólica, ya que cuentan con planicies que facilitan el paso del aire. El eje volcánico también alberga puntos idóneos para la instalación de plantas de generación geotérmica, mientras que muchos de los ríos que hay en el país pueden ser útiles para la instalación de centrales hidráulicas. La demanda del Sistema Eléctrico Nacional en cuanto a energías renovables debe tomar en cuenta que la generación de energía, debe usar recursos renovables. En seguida se describen algunas de las características de estas energías: energía eólica; energía geotérmica; energía hidráulica; energía mareomotriz; energía solar; producción de energía por biomasa.

Energía Eólica en México

La obtención de energía a partir de la generación de energía cinética o de movimiento que produce el viento. A mediados de los años 70, empezó a producirse. De acuerdo con la Asociación Mexicana de Energía Eólica, en México, ya operan 32 parques eólicos, AMDEE, (2015). En el presente año, se puso en marcha, el parque eólico Tres Mesas, ubicado al norte del estado de Tamaulipas. Con inversión superior a 125 millones de dólares, generando más de mil empleos directos y contratando casi 50 empresas locales en proveedurías, ya tiene concluidas las estaciones lectoras y de interconexión con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), además 20 de las 49 gigantes torres eólicas ya se terminaron de construir (REVE, Sep. 2016).

Beneficios de la generación de energía eólica: Es un recurso renovable y limpio; Producido con tecnología económica; El impacto ambiental es muy bajo y; Se utiliza con éxito en muchos países desde hace mucho tiempo.

Riesgos: La más importante, es la necesidad de las corrientes de aire constantes. Para que sea redituable su implementación; la mayoría de los parques eólicos se encuentran por lo general en las costas; las hélices pueden causar daño a las aves y generan impacto visual.

Energía Geotérmica (EG)

Esta energía, aprovecha el calor interior o energía calorífica de la tierra y se le reconoce como Geotermia. La EG, se se produjo desde hace miles de años por actividad tectónica. La temperatura aumenta de 2 a 4° por cada 100 m de profundidad. (Energía Geotérmica, 2015). En México las explotaciones principales se localizan en el centro del país. Ocupa el tercer lugar mundial en su generación. El Financiero, (2014). Los cuatro campos geotérmicos bajo explotación en México, producen 958 MW son los siguientes: En Mexicali, Baja California, opera la planta de Cerro Prieto, la mayor central de energía geotérmica a nivel mundial, con capacidad de 20 MW; Los Azufres en Michoacán 188 MW; Las Tres Vírgenes en Baja California Sur 10 MW; Los Humeros en Puebla 40 MW. (Forbes 2016).

Beneficios: En México existen más de 20 manifestaciones termales con potencial para obtención de energía. Considerada como fuente de un alto rendimiento; El bajo costo tecnológico para su extracción; No necesita grandes extensiones de terreno, el impacto al paisaje es mínimo; No necesita estanques para el desagüe de aguas negras.

Riesgos: No todas las manifestaciones termales son aptas para la obtención de energía, la mayoría se utiliza como aguas termales, como atractivo turístico; Se puede considerar como semirenovables.

Energía Hidráulica

Esta energía se obtiene de la energía cinética, por caídas de agua en forma de cascadas o por corrientes de agua. Es considerada como renovable. Requiere del equipamiento de grandes turbinas y un alternador para convertirla en energía eléctrica. México cuenta con grandes centrales hidroeléctricas. El país tiene un importante potencial hidroeléctrico. Estimado en 3.200 MW en los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla y Tabasco.

Beneficios: Se considerar energía limpia siempre y cuando cumpla con lo siguiente: Su impacto ambiental suele ser casi nulo; Usa la fuerza hídrica sin represarla; Alto rendimiento energético y el costo de operación es bajo.

Riesgos: Produce un gran impacto ambiental; La construcción de presas, provoca la disminución del caudal de los ríos; altera la calidad de las aguas; Cuando se inundan grandes superficies de terreno y se modifica el caudal del río; Producen

pérdidas de suelo productivo y fauna terrestre. La construcción de centrales hidroeléctricas es costosa y se necesitan grandes tendidos eléctricos.

Energía Mareomotriz (EM)

México solo tiene un área para la obtención energía mareomotriz. En la costa de California con extensión de 2600 Km². La energía se obtiene aprovechando el movimiento de las olas, la diferencia de la altura media de los mares, con lo que se puede crear una gran cantidad de energía cinética la cual se almacena para la generación de electricidad, La EM, se origina a partir del viento, los cambios de temperatura y salinidad en el agua y por las fuerzas de gravedad. Su inversión inicial es alta y sólo es redituable en donde las olas son constantes y poderosas.

Beneficios: Es la forma más concentrada de energía renovable ya que es ambientalmente benigno y no contaminantes: no usa combustible; En México existen altas demandas de energía cerca de las costas; La potencia de las olas es predecible y confiable como para predecir con exactitud su espectro y el poder días antes.

Energía Solar

En México el uso de la energía solar o también llamada de celdas, en los últimos diez años se ha popularizado, ya que se demostró, que es más económica de lo que se pensaba. La radiación solar es inmensa e inagotable. Puede ser captada por celdas fotovoltaicas, cada vez más eficientes para transformarse en energía eléctrica. El 70 % de las ofertas presentadas en la primera subasta de largo plazo del sector eléctrico, realizada en mayo de éste año, correspondían a desarrollos de energía solar fotovoltaica. El costo de la energía solar generada en México se redujo 70 por ciento desde 2010 a la fecha, y se prevé que se inviertan 5 mil millones de dólares para producir 4 mil MWs adicionales/h.(Asociación Mexicana de Energía Eólica. AMDEE, 2015).

Beneficios: Es una forma de obtención de energía limpia y renovable; Es rentable con 8 h de radiación solar; Su generación puede ser para un edificio o para una ciudad; Si se genera más que la que se consume, la CFE, paga; Su implementación es sencilla y no requiere de mucho mantenimiento.

Riesgos: Para captar grandes cantidades de energía se requiere de grandes extensiones de terreno por lo que la inversión inicial es grande. Muchos de los insumos que se requieren en la generación de energía solar son importados; Es la energía más redituable de las energías renovables La Jornada ago. (2016).

Energía por Biomasa

La biomasa, es generada por la descomposición de la Materia Orgánica (MO), tanto de origen vegetal como animal. Cualquier tecnología empleada para la generación

de energía, emitirá CO₂, como subproducto de la descomposición orgánica Solo que en la biomasa es menor y de fácil absorción por otras plantas (Endesa, 2017-17). El aprovechamiento de los residuos urbanos, agrícolas y forestales, permitirá poner en funcionamiento plantas de biomasa, que a su vez, podrían generar ganancias en un sector que aún tiene grandes oportunidades de crecimiento.

Beneficios: La biomasa es renovable. Es la única que puede permitir un balance de Los subproductos que se forman pueden ser absorbidos por las plantas; Se puede aprovechar el biogás que se forma, además se puede obtener bioetanol que contamina menos que la gasolina.

Riesgos: El uso de madera propicia la deforestación y requiere de calor; Cualquier proceso de combustión genera emisiones contaminantes de sus subproductos; Los insumos que se requieren deben de ser controlados ya que si se descuida la emisiones de CO₂ pueden aumentar de manera considerable.

En cuanto a las energías no renovables o difíciles de renovar. Dentro de las energías no renovables o muy difíciles de renovar se encuentran: la producción por combustibles fósiles; carbón; petróleo; gas natural; energía nuclear o atómica, que requiere de elementos radiactivos.

Combustibles Fósiles

Se consideran combustibles fósiles: el carbón, el petróleo y el gas natural. Los combustibles fósiles fueron y siguen siendo la principal fuente de energía en el mundo. En diversos estudios se ha comprobado que la producción de energía con combustibles fósiles, tiene un alto costo ambiental ya que, se le atribuyen los impactos ambientales más devastadores como: cambio climático; destrucción de la capa de ozono; efecto invernadero; la lluvia ácida; aumento de las partículas en el aire. Las características de estos combustibles son: el carbón para generar energía. Desde la prehistoria hasta nuestros días el carbón ha sido la fuente de energía más usada y explotada industrialmente, de acuerdo con La U.S. Energy Información Agency (EIA), proyecto, que para el año 2040, el carbón seguirá siendo la principal fuente de energía eléctrica. Se cree que en EE.UU, en ese año, el uso del gas shale será igual que el del carbón. El Caribe, (2013).

El carbón es un combustible fósil, que se produce en millones de años, a partir de restos vegetales, que fueron cubiertos por capas de suelo bajo presión y alta temperatura en condiciones anaeróbica. Las centrales térmicas de carbón pulverizado constituyen la principal fuente mundial de energía eléctrica. La tecnología sigue avanzando para minimizar las emisiones contaminantes y mayor eficiencia en la generación de energía Muñoz y Grau, (2013).Las plantas de carbón producen electricidad a partir de combustión, en un generador que transforma

el agua en vapor de alta presión y alta temperatura que impulsan un generador eléctrico para producir electricidad. TENARIS, 2013-2015.

Beneficios: Se calcula que existen reservas de carbón para 100 años; Avances tecnológicos hacen más eficiente energético al carbón; Dos tercios del acero mundial se producen utilizando coque de carbón.

Riesgos: Su combustión emite óxidos de azufre, bióxido de carbono y de óxidos de nitrógeno; Mayor costo de producción que el uso de petroquímicos. Además crea sustancias abrasivas, corrosivas y erosivas y se puede considerar el combustible más sucio.

Producción de petróleo o gasolina

Se estimó en el 2004 que los yacimientos son suficientes para satisfacer la demanda actual durante más de 200 años. Sus aplicaciones son en la: Generación de electricidad (2/3 partes), industria siderúrgica y en fabricación de cemento. Los yacimientos de hidrocarburos están formados por una mezcla de moléculas de hidrocarburos, junto con otras sustancias como agua salada, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, etc.

Antes de la explotación de cualquier depósito se requiere de una etapa de exploración, que implica la localización de yacimientos y el muestreo. Con lo cual se determina el tipo de infraestructura que se va utilizar y se delimita la zona de influencia. Después de explotados los pozos, se obtiene la mezcla de hidrocarburos o crudo, el cual deberá pasar por una refinación con la que se separan productos que pueden ser comercializados.

Gas Natural

Gas de esquisto, de pizarras o de lutitas, en inglés Shale Gas (SG), son los nombres con los que se reconoce el gas natural, atrapado en rocas intrusivas. Nombrado también gas no convencional, es el gas que se encuentra contenido en la misma roca donde se generó y que no puede ser producido con rentabilidad, sin la cuidadosa aplicación de la tecnología específica, mediante (fracking) fracturación hidráulica. García, Juan, (2013). En México, se presenta una importante área de oportunidad con la extracción del SG, que ofrece grandes beneficios. Aunque es importante recordar que la ciencia y la tecnología, no son un bien absoluto, ya que siempre que presentan beneficios, implican también riesgos. En el proceso de extracción es necesario identificar y caracterizar los riesgos por contaminación química la cual es un riesgo potencial en este proceso. Una vez determinados y caracterizados, se analizarán las opciones de tecnologías para implementar asegurando la eliminación o mitigación de los riesgos, de manera que al determinar el cociente de deseabilidad (CD), los beneficios superen los riesgos.

Beneficios: Hay grandes yacimientos en México, alternativa por la escasez de petróleo; Si se cumpliera con la normatividad el impacto negativo sería menor que el de la extracción de petróleo.

Riesgos: Contaminación del suelo. Aire y agua. Extinción de flora y fauna; impacto en la salud de los pobladores; combustión espontánea.

Producción con energía nuclear

Es la energía almacenada en el núcleo de los átomos, que se desprende en la desintegración de dichos núcleos. Esta energía es la liberada del resultado de una reacción nuclear, se puede obtener mediante dos tipos de procesos: Fusión Nuclear (unión de núcleos atómicos pequeños y livianos) y Fisión Nuclear (división de núcleos atómicos grandes y pesados). En las reacciones nucleares se suele liberar una gran cantidad de energía. Lo anterior se basa en la ecuación $E = mc^2$, producto del físico Albert Einstein. La energía producida en las centrales nucleares se emplea para calentar agua que, convertida en vapor, acciona unas turbinas unidas a un generador que produce la electricidad. (Chang, 2011). La generación de energía de esta fuente, prometía crecer exponencialmente hasta que fue interrumpida por las catástrofes nucleares ocurridas en 1986 en Chernobil en Ucrania y en Fukushima en Japón. Este último fue en marzo de 2011, como efecto de un terremoto y tsunami de Japón, alcanzaron el mayor nivel: 7.

Beneficios: Pequeñas cantidades de combustible (reactivos nucleares), se producen una gran cantidad de energía y sus reservas de materiales son abundantes; La cantidad de residuos es menor que las alimentadas por hidrocarburos.

Riesgos: Las centrales nucleares generan residuos altamente contaminantes y de difícil eliminación; El confinamiento de residuos nucleares es costoso y no siempre segura; El peligro de radiactividad exige la adopción de medidas de seguridad y control que resultan muy costosas.

2.4. Legislación Energética en México

La primera Ley del Petróleo, promulgada en 1901, permitía al presidente de la república otorgar permisos a empresas y particulares para explotar los terrenos propiedad de la Nación. Posteriormente, con la promulgación de la Constitución Política de 1917 (CPEUM), se estableció en el artículo 27 la restitución de la propiedad de las riquezas del subsuelo. Durante el desarrollo histórico del sector petrolero permitió la participación privada en la industria del petróleo y gas. Con el tiempo se originaron problemas laborales entre los trabajadores y las empresas. En 1938, el presidente Lázaro Cárdenas decretó el día de la expropiación petrolera el 18 de marzo y creó Petróleos Mexicanos. (Gamboa, 2013).

En el año 1960, se hacen reformas como: La prohibición de las concesiones en materia de petróleo o cualquier hidrocarburo; El otorgamiento de contratos y la insubsistencia de los ya otorgados, dejando la explotación a cargo de la nación. En febrero de 1983 se reformaron los artículos 26, 27 y 28 de la Constitución para establecerse, que no constituyen monopolios las funciones exclusivas del Estado en áreas estratégicas de hidrocarburos, así como petroquímica básica. En los años 1995, 2003 y 2008, se realizaron reformas que permitían la participación privada limitada en la industria petrolera. (López Carreón, 2015). En el 2012, Petróleos Mexicanos identificó reservas de aceite y gas shale en los estados del norte de la república: Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

La mayor concentración documentada de petróleo y gas del país se encuentra en “Cuenca de Burgos”, que es una extensión de los yacimientos del Estado de Texas a los estados de Tamaulipas y Nuevo León. (Rubalcaba, Sánchez y col).

En el 2013, el discurso fue “La necesidad de una reforma energética para modernizar a PEMEX. En diciembre del 2013, la reforma energética se aprobó con lo que se abrió legalmente el mercado energético de los hidrocarburos a la iniciativa privada. Con la idea de que mayor competencia bajaría su precio.

En el 2014 se aprueban las leyes secundarias a la reforma energética constitucional aprobada en diciembre de 2013. Para ello, se dividieron las iniciativas de ley, en la elaboración de cuatro dictámenes, las cuales quedaron de la siguiente forma: documentada de petróleo y gas del país se encuentra en “Cuenca de Burgos” que es una extensión de los yacimientos del Estado de Texas a los estados Tamaulipas y Nuevo León. (Rubalcaba, Sánchez y col). En noviembre de 2015 se conoce que: PEMEX recibió licencia de un año del gobierno de Estados Unidos para importar crudo ligero estadounidense y procesarlo en sus refinerías, a cambio de crudo mexicano. Con lo cual PEMEX podría producir combustibles más redituables y no combustóleo, que se dejó de utilizar como insumo para generar electricidad (La Jornada, 1 de nov. de 2015).

2.5. Impacto Ambiental en la obtención de energéticos

Las principales afectaciones socio-culturales de las actividades petroleras:

- a) Impactos ambientales por residuos al: agua; aire; suelo; salud de pobladores y animales; por último impactos negativos a la cultura (usos y costumbres).
- b) Escasez de alimentos y aumentos de precios de la canasta básica.
- c) Afectaciones a la agricultura y ganadería compensadas debajo de su precio.
- d) Disminución del valor los bienes inmuebles de los locales.
- e) Impacto en los niveles salariales locales debido a las diferencias de salarios así como conflictos que en ocasiones han implicado diversos tipos de violencia.

f) Restricción en La movilidad para satisfacer sus necesidades se ve limitada. Además el tránsito constante de pipas y camiones generan enfermedades.

g) Cambio de costumbres que en ocasiones propicia la drogadicción, la apertura de bares, prostíbulos entre otros.

h) Abandono de pozos sin saneamiento.

i) En la Generación de energía eléctrica en el 2014 las emisiones por su generación se incrementarán hasta 160 Tm de CO₂ y CO el 32% del total.

La generación de energías alternativas, limpias de aplicación exitosa, como la: generada de los residuos sólidos; la solar; la hídrica y la eólica entre otras. Se constituyen como respuesta viable para sustituir al petróleo, que se lograrían implementar apoyando el desarrollo tecnológico, al crecimiento económico.

La sustentabilidad de los recursos naturales y la prevención impactos por la actividad humana, el mejoramiento de la infraestructura municipal y la regulación de las actividades urbanas e industriales, pueden y deben constituirse como el fundamento para la aplicación de prácticas, encaminadas a proporcionarle a la población un espacio donde pueda desarrollar sus potencialidades, mejorar su calidad de vida, con gestión para la colaboración entre la sociedad y el gobierno.

Generalidades de la zona sur de Tamaulipas

Localización. Se encuentra ubicado en la porción sur del estado de Tamaulipas en México, (Ver figura 15 y 16). 3.08 m. ros sobre el nivel del mar.

La Población, total del estado de Tamaulipas fue de: 3 441 668 habitantes. La distribución de densidad poblacional del país 61/km², en Tamaulipas 43/km². Nivel de escolaridad en mayores de 15 años, en el país es 9.1 años en Tamaulipas 9.4, Alfabetismo en el país 6/100 en Tamaulipas 3/100h.

Principales Sectores Económicos del estado son: Industrial, Comercial, Portuaria Turística y de Productos así como de servicios.

Existen en el municipio grandes, medianas y pequeñas industrias las cuales sirven como fuentes generadoras de empleos para la población. Ejemplos de las grandes industrias son las Refinería de Petróleos Mexicanos, considerada como de las más modernas de América Latina. Además del Puerto Industrial de Altamira, la más grande de Latino América.

Pesca. Dada su ubicación geográfica, colinda con el Golfo de México y grandes ríos. La zona constituye una de las principales fuentes de explotación pesquera. Turismo, su principal atractivo turístico es: la Playa de Miramar con su malecón; además los edificios de la época del Porfiriato.



Colinda: al norte con EE.UU, al sur con el estado de Veracruz; al este con el Golfo de México y al oeste con San Luis Potosí y Veracruz. La zona está ubicada en la región Norte del Golfo de México, formando parte de la Cuenca baja del Río Pánuco, en la porción sureste del Estado de Tamaulipas. Evolución Demográfica. Según INEGI, (2015).

Vivienda. De acuerdo con el Censo de población y vivienda, (2015). Más del 90%, cuenta con energía eléctrica, agua potable y alcantarillado, drenaje, vialidad y transporte, panteones y centros de abasto, seguridad pública, tránsito, limpieza, parques, jardines y cuerpo de bomberos. Predomina la vivienda de propiedad privada, cuenta medios de comunicaciones aéreas, marítimas y terrestres tanto, nacionales como internacionales.

Ordenamiento Territorial en la Zona de Estudio

El término de Ordenamiento Territorial (OT) o Desarrollo Urbano (DU), consiste en un conjunto de normas que forman parte de una política de Estado en lo relativo al DS.

Este instrumento puede involucrar aspectos económicos, políticos, sociales valiéndose de su carácter obligatorio, incluido en la LGEEPA. Uno de los retos más complicados para lograr la sustentabilidad en la zona, es el manejo integral de los residuos sólidos urbanos (RSU).

La zona, presenta características muy específicas, se refleja en una variación estacional de población flotante así como en la generación de residuos. INEGI, (2010).

Programas Internacionales que apoyan el Desarrollo Sustentable. DS

A. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (PNUMA). Con su Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)-Meta 7D:

haber mejorado considerablemente, para el año 2020, la vida de por lo menos 100 millones de habitantes. Con sus tres puntos, que son: Desarrollo Social y Comunitario. Participación social de la organización; para la construcción, habilitación, equipamiento apoyados por el programa, el mejoramiento del Entorno Urbano. Introducción de redes de infraestructura urbana básica y realización de obras de mitigación de riesgos, y la promoción del Desarrollo Urbano. Se apoya la actualización de planes, programas y reglamentos municipales; acciones que contribuyan a alentar la participación social y la coordinación intersectorial para beneficio social.

B. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, (UNESCO). La educación para el desarrollo sostenible, (EDS). Tiene por objeto ayudar a las personas a desarrollar actitudes y capacidades y adquirir conocimientos con miras a abordar los problemas sociales, económicos, culturales y medioambientales del futuro.

C. Organización de Estados Americanos. (OEA). El Departamento de Desarrollo Sostenible apoya a los Estados Miembros de la OEA en el diseño y la implementación de políticas, programas y proyectos orientados a integrar las prioridades ambientales con el alivio de la pobreza y las metas de desarrollo socioeconómico. Apoya la ejecución de proyectos que incluyen países en desarrollo.

D. Acerca de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos, (OCDE). Hace énfasis en: Hacer que los mercados trabajen para un medio ambiente más sano; Utilizar la ciencia y la tecnología para beneficio de todos; Disminuir la contaminación y los desperdicios; Fomentar la discusión de los temas fundamentales concernientes a la energía. Principales áreas de trabajo: Asegurar el acceso equitativo a la educación; Promover sistemas de salud efectivos y accesibles; Luchar contra la exclusión social y el desempleo; Acortar la brecha digital entre ricos y pobres.

E. Comisión del Desarrollo Sostenible, (CDS). Fue creada en 1993, para: garantizar el seguimiento y la realización de los compromisos asumidos en la Cumbre de la Tierra de Río. Reforzar la cooperación internacional; examinar los progresos realizados en la aplicación de las agendas 21 a nivel nacional, regional e internacional.

F. Banco Mundial. (BM). (Agosto, 2016). En el Banco Mundial. Para lograr una prosperidad compartida, necesitan acciones locales y concretas. Existe un gran vínculo y una gran relevancia en concentrarnos cada vez más en el uso de la energía en las ciudades. Las razones para este enfoque son bastante claras. Más de la mitad de la población global vive en ciudades y la tendencia mundial hacia la urbanización continuará aumentado. Hoy en día en México, el 70% de la población vive en ciudades y se prevé que este número aumente a 88% para el año 2027. Esto significa

que en 2030 nueve de cada 10 mexicanos vivirán en ciudades. En las ciudades se consume el 70% de la energía en el mundo. También emiten tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero. La rápida urbanización, junto con el progresivo aumento en los ingresos y la calidad de vida de los ciudadanos, está contribuyendo a un aumento significativo en la demanda de energía, así como en los requerimientos de infraestructura básica y en la prestación de servicios municipales.

2.6. Vinculación entre modelos de planificación. Nación, el estado y el municipio

México ya ha tenido cambios a nivel fiscal que impulsan el uso de este tipo de energías y propician una mayor conciencia ambiental, México está en camino de convertirse en uno de los países más sustentables de Latinoamérica. Se considera importante estudiar las estrategias utilizadas en otros países como los de la Unión Europea, o Costa Rica ya que en Latinoamérica es un ejemplo a seguir en cuestiones del cuidado en medio ambiente y que pretende que en este año se logre que toda la energía que use sea de fuentes renovables. Con un ordenamiento territorial adecuado que garantiza a todos sus ciudadanos el acceso a los servicios públicos.

En nuestro país se hacen esfuerzos por concientizar a la población sobre la importancia del cuidado del medio ambiente, incorporado en el diseño curricular los principios de sustentabilidad del medio ambiente en los tres niveles de educación, se han creado nuevos instrumentos normativos que buscan regular estas acciones del gobierno, favoreciendo la tecnología limpia la cual minimice el uso de energía y la generación de residuos, convirtiéndose en acciones prioritarias.

Es importante tener presente la estrategia operativa de La Red de Observatorios Urbanos, con la coordinación global de ONU-HABITAT, incluye los siguientes objetivos:

Tabla 2.3. Objetivos La Red de Observatorios Urbanos, con la coordinación global de ONU-HABITAT

OBJ	Descripción
1	Estimular procesos consultivos para identificar e integrar las necesidades y oportunidades de información urbana
2	Contribuir en la capacitación de los actores urbanos en relación a la recolección, gestión y uso de la información urbana para políticas sectoriales, a partir de indicadores y la aplicación de adecuadas prácticas y políticas
3	Propiciar la información y el análisis objetivo, a todos los actores urbanos para

OBJ	Descripción
	que participen en igualdad de condiciones, y con eficiencia en los procesos de toma de decisión con respecto a las políticas urbanas y su implementación
4	Compartir información, conocimiento y experiencias con otros observatorios urbanos, utilizando tecnologías e infraestructuras apropiadas para cada caso

Fuente: IMEPLAN sur detamaulipas.gob.mx

Es importante mencionar que las fuentes de las energías alternativas ofrecen una aplicación exitosa se constituyen cada vez más como una respuesta viable para sustituir al petróleo como principal generador energético. Pérez Franco, D. (2007). Para ello, se debe considerar la vinculación de la planificación de diferentes marcos regulatorios que dependen de elementos consignados en el documento “Visión México 2030”. Los municipios atienden las directrices nacionales y estatales para dar origen a su propio documento de planificación que busca equilibrar el desarrollo municipal con las condiciones imperantes en su contexto energético nacional.

Aquí se presentan los Parámetros de Sustentabilidad Ambiental del Banco Interamericano de desarrollo (BID), expresados a través de Indicadores de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sustentables del estado de Tamaulipas.

Tabla 2.4. Parámetros de Sustentabilidad Ambiental del Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

Parámetro	Subtema	Indicador
Energía	Cobertura energética	% RSU que se utilicen para generación de energía ≥ 70 . 40-70. ≤ 40
		% de hogares de la ciudad con conexión de energía eléctrica 90-100. 70-90. ≤ 70
		% de hogares conectados al suministro de gas Natural ≥ 25 . 15-25. ≤ 15
		Cantidad promedio de interrupciones eléctricas al año por cliente. Cant/año/cliente. ≤ 10 . 10-13. ≥ 13
	Eficiencia energética	Duración promedio de las interrupciones en horas /cliente ≤ 10 . 10-15. ≥ 15
		Consumo anual residencial de electricidad por hogar kwh/hogar/año 1500-3500. 35000-5000. ≥ 5000

Parámetro	Subtema	Indicador
		Kg de equivalente del petróleo por unidad de pérdida de poder adquisitivo del PIB comparado con la media de los países de América Latina Caribe (ALC)
		Existencia de monitoreo y cumplimiento de las NOMs de eficiencia energética. Si/no % de energía renovable sobre el total de la generación de energía
Calidad del aire	Energía Alternativa y Renovable	Existe monitoreo y cumplimiento con las reglas de calidad de Aire. SI/NO
	Control de Calidad del Aire	Existe monitoreo y cumplimiento con las reglas de calidad de Aire. SI/NO
	Concentración de contaminantes del Aire	Índice de calidad del aire 0-50. 51-100. +100 Concentración PM10/Micras/M3 /24h 50. 50-150. +150

Fuente: BID 2016

Conclusiones

El gran potencial energético que posee Tamaulipas conlleva a un incremento en la presión ambiental y deterioro de los ecosistemas, emitiendo gases de efecto invernadero a la atmósfera, tan solo en el 2016 Tamaulipas superó los 40 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono, que constituyen aproximadamente el 5% del total nacional. Se espere que éste impacto se mitigue cuando entren en función los parques de energía eólica que están en construcción. En algunas ciudades como Cd. Madero y Tampico se podría recomendar la construcción de vivienda vertical, ya que no cuentan con terrenos disponibles para expandirse de forma horizontal. Es necesario incluir las fuentes de energía alternativa dentro del diseño urbano al igual que el monitoreo y control de las emisiones. Las energías alternativas se constituyen cada vez más como una respuesta viable a largo plazo para sustituir al petróleo como generador energético, como parte del esfuerzo realizado para minimizar el impacto del cambio climático. Por la ubicación geográfica de la zona, en el litoral tamaulipeco, las fuentes de las energías alternativas con posibilidades de desarrollo, se pueden citar: residuos urbanos e industriales; energía solar; energía hídrica; energía mareomotriz; energía eólica.

Es indispensable que los municipios se apoyen en los programas federales y estatales para alcanzar sus metas de desarrollo sustentable. De igual forma en los programas internacionales como el PNUD, OEA, OCDE entre otras, que apoyan proyectos de: Desarrollo Social y Comunitario; Mejoramiento del entorno urbano y su promoción, un ejemplo es el BID, que apoya programas para ciudades emergentes.

Lista de referencias

- CENACE (2016). Información del Centro Nacional de Control de *Energía los resultados preliminares de Subasta de Largo Plazo* (22 de septiembre del 2016).
- CGLU (2010). La Cultura es el cuarto pilar del Desarrollo Sostenible, Ciudades y Gobiernos Locales Unidos, 2010.
- GOBIERNO DEL ESTADO DE TAMAULIPAS. *Plan Estatal de Desarrollo Tamaulipas 2005-2010*. Cd. Victoria; 2011- 2015.
- INEGI (2010 y 2015). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Censo General de Población y Vivienda 2010*. México.
- MUÑOZ-GRAU, Universidad Química Edición digital: abril de 2013.
- OŠLAJ, M., & MURŠEC, B. (2010). *Tehnicki vjesnik / Technical Gazette*, 17 (1), 109-114.
- PÉREZ FRANCO, D. (2007). La importancia de aprovechar la pequeña hidroenergía. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 28 (2), 3-5.
- PEDUST. Programa Estratégico para el Desarrollo Urbano y Sustentable de Tamaulipas 2008-2030.
- POLETTI, J. A., & DA SILVA, C. L. (2009). Influencia de la Separación de Residuos Sólidos Urbanos para Reciclaje en el Proceso de Incineración con Generación de Energía. *Información Tecnológica*, 20 (2), 105-112.
- POLO, J. M., RODRÍGUEZ, J., & SARMIENTO, A. (2008). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. *Revista de Ingeniería* (28), 99-105.
- ROMERO RIVERA, D., & CHÁVEZ, M. (2008). *La Energía Alternativa ya está aquí*. *Contenido* (541), 58-63.
- SISTEMA DE INFORMACIÓN ECONÓMICA (SENER), 2013 y 2015. *Prospectiva del Sector Eléctrico (2012-2026) Satisfacer el consumo Nacional futuro de energía eléctrica*.
- SLIDE SHARE, AEM, México Espacio 2013-2018 Dr. F. J. Mendieta, director General de AME.
- STRAHAN, D. (2009). A real waste of waste. *Ecologist*, 39 (3), 2-4.

Material obtenido de Internet

- Banco Mundial, Lanzamiento del Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética Municipal Agosto 24, 2016 <http://www.bancomundial.org/es/news/speech/2016/08/24/lanzamiento-del-proyecto-de-eficiencia-y-sustentabilidad-energetica-municipal>
- Desarrollo Energético Sustentable un Desafío Pendiente, Universidad de Chile 2006 www.uchile.cl/noticias/32284/desarrollo-energetico-sustentable-un-desafio-pendiente. (28 de septiembre de 2006)

- El Shale Gas (2/3) Prospectos Mexicanos, Apuntes sobre Energía, Merlín Cochran, (2014). <https://apuntesenergia.com/2014/01/03/gas-shale-23-prospectos-mexicanos/> (3 de enero del 2014)
- ENDESA, 2016, www.meff.com/aspx/Financiero/Ficha.aspx?id=esp&ticker=ele (28 de noviembre de 2016)
- ENERGÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE, SISTEMAS DE PRODUCCIÓN, (2016). <http://www2.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/sistemas.htm#gas> (31 de marzo de 2016)
- FORO MÉXICO: Espacio 2013 2018, Carlos Duarte, (2013). <http://es.slideshare.net/CarlosDuarte39/foro-mexico-espacio-2013-2018> (29 de enero del 2013)
- GEOTERMIA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN MÉXICO, ¿Es Realmente Viable?, Miguel Alejandro González, <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/treMiguelGG09.pdf>
- IMEPLAN, sur de Tamaulipas. (2007 – 2012) http://www.imeplansurdetamaulipas.gob.mx/Pdf_POTMunicipales/POT%20Zona%20Metropolitana.pdf. (2007 – 2012)
- LAS HIDROELÉCTRICAS EN MÉXICO, PASADO, PRESENTE Y FUTURO, LEONARDO RAMOS, (2012). <http://www.revistagenteqroo.com/las-hidroelectricas-en-mexico-pasado-presente-y-futuro/> (1° de junio del 2012)



CAPÍTULO 3

Riesgo geológico y fenómenos asociados en áreas urbanas



Riesgo geológico y fenómenos asociados en áreas urbanas

Tomás Peña Alonso

3.1. Introducción

La **Geología** es la ciencia que estudia la estructura, la dinámica y la evolución del planeta a través del análisis de la composición de las rocas y de los procesos físicos y químicos que influyen en ellas. Tales procesos físicos y químicos, referidos como “procesos geológicos”, le dan forma al relieve del planeta y ocurren gracias a varios agentes naturales importantes, como el clima y la tectónica de placas.

Los procesos geológicos se llevan a cabo en períodos de tiempo muy largos, desde miles de años, como el transporte de agua subterránea o períodos de erosión (e.g., von Blanckenburg, 2005), a millones de años, como el desplazamiento de las placas tectónicas. Sin embargo, algunas veces, estos procesos pueden desencadenar fenómenos de corta duración que pueden afectar áreas pobladas cercanas. Entre estos fenómenos, se pueden mencionar las erupciones volcánicas, los terremotos, los tsunamis, los deslizamientos y las subsidencias, entre otros.

El **peligro geológico** es una condición o característica intrínseca de los procesos geológicos. El peligro geológico puede causar lesiones en vidas humanas, daño a las propiedades y/o paralización de uno o varios procesos urbanos vitales. El **riesgo geológico**, por su parte, involucra la combinación entre la probabilidad de que ocurra un fenómeno geológico peligroso de corta duración y las consecuencias que éste fenómeno pueda causar en un asentamiento humano.

En consecuencia, puede existir el mismo peligro geológico en dos regiones diferentes (por ejemplo, una densamente poblada y otra escasamente poblada), ya que el fenómeno geológico intrínseco (por ejemplo, una erupción volcánica) se va a desencadenar independientemente de los asentamientos humanos presentes. Ahora bien, el riesgo geológico va a ser más elevado en la región con mayor población, ya que la afectación humana y de infraestructura sería mayor.

El objetivo de este trabajo es brindar por secciones una descripción básica de los fenómenos geológicos que implican riesgo para áreas urbanas. Se expondrán los siguientes fenómenos: actividad volcánica (sección 2), inestabilidad de laderas (sección 3) y subsidencia (sección 4). Al final de cada sección se mencionan y

discuten algunas de las medidas preventivas que pueden ser utilizadas para su mitigación.

3.2. Actividad volcánica

El riesgo de que ocurran pérdidas catastróficas debido a erupciones volcánicas es significativo si se consideran el continuo crecimiento que está experimentando la población global y la proximidad de las zonas urbanas a volcanes activos. Tilling y Lipman (1993) estimaron que en el año 2000, alrededor de 500 millones de personas estarían expuestos a la erupción de alguno de los 600 volcanes activos conocidos en el planeta. De otra estimación realizada por Doocy et.al., (2013), se calcula que los eventos volcánicos que ocurrieron entre 1900 y 2008 han afectado de alguna manera a por lo menos 4.72 millones de personas y han provocado la muerte de 91 700. Estos mismos autores comentan que más del 80% de las muertes causadas por erupciones volcánicas (asfixia por ceniza, quemaduras y traumas) ocurrieron debido a diez erupciones concentradas en cuatro localidades (Martinica, Colombia, Indonesia y Guatemala).

3.2.1. ¿Qué son los volcanes?

Los **volcanes** son edificios en forma de conos o domos que suelen sobresalir del relieve de un terreno. A través de ellos es expulsado un material natural conocido como **magma** que puede alcanzar temperaturas mayores a 1150 °C. El magma es una mezcla de rocas, cristales, fundido y gases disueltos en proporciones muy variables, generada a grandes profundidades (Spera, 2000). Los cristales y fundido que componen a los magmas suelen estar formados por óxidos de silicio (silicatos). Una vez generado, el magma puede ascender a través de grandes distancias, almacenarse en cámaras magmáticas, y ser expulsado hacia la superficie durante las erupciones volcánicas. Dado el caso, el magma es renombrado como **lava**. Un **cráter** es la estructura de los volcanes por donde suele salir la lava.

3.2.2. Erupciones volcánicas

La lava puede salir de los volcanes a través de una **erupción efusiva**, que consiste en la emisión de grandes cantidades de lava que fluye con relativa facilidad, o de una **erupción explosiva**, en donde la lava es expulsada de manera violenta como fragmentos sólidos y partículas muy finas. Lo efusiva o explosiva de una erupción depende de tres parámetros: (a) la cantidad de gases disueltos en los magmas; (b) su contenido de dióxidos de silicio (sílice); y (c) su velocidad de ascenso. A mayor contenido de sílice, mayor viscosidad presentan los magmas y, por lo tanto, mayor dificultad tendrán para fluir. La relación entre los tres parámetros anteriormente

mencionados puede describirse considerando, en un inicio, que cuando los magmas se encuentran a grandes profundidades, las rocas que se encuentran por encima de ellos los someten a grandes presiones, al igual que sus gases disueltos. Sin embargo, el ascenso del magma hacia la superficie promueve el decremento de la presión.

Este decremento permite que el gas comience a separarse del magma en forma de burbujas, como lo que le ocurrirá a una bebida gaseosa embotellada al ser destapada. Mientras la presión siga decreciendo, el tamaño de las burbujas continuará aumentando gracias al incremento de la presión generada desde el interior de las burbujas hacia afuera. Si por un lado la presión interna de las burbujas aumenta, y por el otro los magmas son tan viscosos que dificultan el crecimiento y el movimiento de las burbujas embebidas en ellos, la presión mantenida por las burbujas podrá superar la cohesión del magma viscoso y “romperlo” de manera súbita. Si este es el caso, el magma saldrá de manera explosiva, atomizada en partículas del tamaño de pequeñas gotas. Esas gotitas de magma serán inmediatamente enfriadas y solidificadas para formar **ceniza volcánica**.

Las erupciones menos explosivas suelen ocurrir en **volcanes escudo**, nombrados así porque son edificios extensos de pendientes muy suaves, que vistos a lo lejos asemejan un escudo abandonado. Este tipo de volcanes expulsan lavas con un bajo contenido de sílice (**lavas máficas**) y con un reducido contenido de gases disueltos. Esas lavas se derraman hacia las zonas circundantes del edificio, por lo que pueden ser referidos como **derrames de lava**.

Según el Observatorio de Volcanes de Hawaii (<http://hvo.wr.usgs.gov/observatory/>), la velocidad de flujo de los derrames de lava puede variar de 0.5 a 10 km/hora, por lo que los casos de muertes asociados con los derrames suelen ser escasos. Sin embargo, han llegado a desplazarse a velocidades mayores de hasta 48 km/h cuando la pendiente de los edificios volcánicos son muy abruptas, cubriendo así grandes extensiones de terreno en poco tiempo (Espíndola y Macías, 1996).

Éste fue el caso del volcán Nyiragongo en la República Democrática del Congo que, al entrar en actividad en 2002, expulsó derrames que se extendieron más de 10 km a velocidades de 10 a 20 km/h, provocando el éxodo espontáneo de alrededor de 300,000 personas y la muerte de aproximadamente 100, en su mayoría niños (Favalli et al., 2008). Los derrames de lava también pueden incendiar, enterrar y ejercer una sobrecarga sobre cualquier edificación hasta provocar su colapso.

Como ejemplos de erupciones volcánicas que han provocado daños en edificaciones se pueden mencionar: la del Monte Vesubio en Italia, que en 1944 destruyó parte de las localidades de Sebastiano y Massa (Rittman, 1962) y la de Heimaey en Islandia, que en 1973 destruyó casas y fincas de la localidad de Vestmannaeyjar (Fig. 1), forzando una evacuación inmediata de 5 300 residentes (Williams y Moore, 1983).



Fig. 3.1. Vista hacia el sur-sureste del frente de un derrame de lava solidificado en una calle que separaba las plantas procesadoras de pescado *Fiskidán hf.* (Izquierda) y *Ísfélag Vestmannaeyja hf.* (derecha). A este frente se le dirigieron chorros de agua para tratar de enfriarlo y así detener su avance. Fotografía tomada el 23 de julio de 1973 por Richard S. Williams, Jr. Fotografía de dominio público del Servicio Geológico de Estados Unidos.

Otro tipo de edificio volcánico lo conforman los **estratovolcanes**, cuya forma cónica presenta pendientes que aumentan progresivamente desde las faldas del edificio volcánico hasta el cráter ubicado en su punta. Los estratovolcanes suelen expulsar lavas de composición química variable, pero con un contenido de sílice (y contenido de volátiles disueltos) usualmente mayor que el de los derrames expulsados de los volcanes escudo. Los estratovolcanes se construyen poco a poco gracias a la acumulación de derrames de lava y de ceniza volcánica que es expulsada durante cada erupción producida, ya sea efusiva o explosiva. Como ejemplos de estratovolcanes típicos se puede mencionar el Monte Fuji en Japón y el Monte Etna en Italia.

La historia eruptiva de muchos estratovolcanes suele incluir el tipo de erupciones más explosivas, referidas como de tipo “pliniano”. Las **erupciones plinianas** se caracterizan por expulsar nubes de gas y partículas sólidas a altas temperaturas y a velocidades de varios cientos de metros por segundo. Aquellas partículas sólidas de mayor peso pueden separarse de las nubes de gas y realizar trayectorias balísticas hacia el terreno que circunda el edificio volcánico.

Las partículas más finas suelen permanecer en la nube y formar enormes columnas (Fig. 2) que pueden alcanzar hasta ~45 km de altura. Estas columnas pueden, en consecuencia, introducir partículas muy finas en las capas más altas de la atmósfera y transportarlas grandes distancias para luego caer y depositarse en lugares muy apartados.



Fig. 3.2. Erupción del 2 de mayo de 2008 del volcán Chaitén (Chile). Este volcán expulsó durante seis horas una columna de ceniza que alcanzó ~17 km de altura. Su actividad continuó hasta el 6 de mayo con una emisión casi continua de ceniza y con explosiones intermitentes. Fotografía de dominio público del Servicio Nacional de Geología y Minería del gobierno de Chile.

Un tercer tipo de edificio volcánico lo conforman los **conos cineríticos**, que se forman por la expulsión de lavas con un alto contenido de sílice, referidos ocasionalmente como **lavas félsicas**. Estas lavas tienen una viscosidad relativamente alta y, por lo tanto, una capacidad de flujo restringida.



Fig. 3.3. Fotografía del pueblo de Parangaricutiro después del nacimiento del volcán Parícutín (derecho). En la mitad de la foto se observa un derrame en forma de un muro negro rodeando a la iglesia y bloqueando la calle. También se aprecia que la madera del pueblo fue removido para evitar incendios mientras el derrame poco a poco cubría el pueblo. Imagen obtenida de una postal escaneada y exhibida en la página <http://www.lakepatzcuaro.org/PostCard6.html>.

Por lo tanto, las lavas félsicas que salen de los conos cineríticos suelen solidificarse en el cráter o en sus inmediaciones. El cono cinerítico que ha aparecido más recientemente en el hemisferio norte del planeta es el volcán Parícutín, (Michoacán, México). Este volcán se formó en un campo de maíz en semanas hasta hacer erupción el 20 de febrero de 1943. A partir de esa fecha hasta 1952 el Parícutín emitió aproximadamente 700 millones de metros cúbicos de lava y otros sólidos volcánicos que cubrieron 24.8 km² de terreno, sepultando los poblados de Parícutín y San Juan Parangaricutiro (Espíndola y Macías, 1996) (Fig. 3).

3.2.3. Cenizas volcánicas

Las cenizas dispersadas en la atmósfera a través de las erupciones plinianas pueden causar daños económicos considerables en una región. Para darnos una idea del por qué, hay que tener en cuenta que una capa de ceniza de 10 cm de espesor pesa de 60 a 110 kg por metro cuadrado, e incluso más del doble si se encuentra húmeda (Kenedi et al., 2000). Por lo tanto, los depósitos de ceniza añaden un peso anómalo encima de las superficies en donde descansan y, en consecuencia, tienen el potencial de ocasionar el colapso del techo de construcciones, arruinar vías de comunicación o devastar la producción agrícola y pecuaria de una región, por mencionar algunas secuelas.

El efecto negativo que pueden ocasionar las cenizas volcánicas en las zonas urbanas puede ejemplificarse con el caso descrito por Kenedi et al. (2000) en el que estuvo involucrada la población del este de Washington (Estados Unidos) quienes, la mañana del 18 de mayo de 1980, vislumbraron una serie de nubes oscuras aproximándose desde el oeste. Estas nubes fueron ocasionadas por la erupción del Monte Santa Helena que arrojó hacia la atmósfera una columna de más de 18 km de altura. Las nubes mantuvieron en oscuridad la región, provocando durante un día una pobre visibilidad en caminos resbaladizos y entorpeciendo el uso de vías de comunicación. Como resultado, más de 10 mil personas tuvieron que suspender sus recorridos habituales y muchas comunidades pequeñas fueron aisladas. Los depósitos de las cenizas provenientes de las nubes alcanzaron hasta 10 cm de espesor, y las partículas más pequeñas penetraron y dañaron vehículos, maquinaria y estructuras civiles. Al final del día cayeron más de 500 millones de toneladas de ceniza a lo largo de los estados de Washington, Idaho y Montana. El total de pérdidas económicas y en propiedades ocasionadas por aquella erupción del Monte Santa Helena ascendió a más de \$1 000 millones de dólares.

Las nubes de ceniza también pueden presentar un serio riesgo para la navegación aérea y, por lo tanto, ocasionar efectos negativos de largo alcance tanto para el turismo como para el comercio. Para las aeronaves en pleno vuelo, el efecto de las cenizas en el interior de una turbina a alta temperatura es muy dañino.

Lamentablemente, el fenómeno es difícil monitorear porque a grandes alturas las nubes volcánicas no son distinguibles de las nubes ordinarias, ni detectables con radar. En tierra, las cenizas causan pérdida de visibilidad y vías resbaladizas, se infiltran en sistemas eléctricos y de comunicación, interrumpen servicios de tierra, y dañan edificios y aeronaves estacionadas. Guffanti et al. (2009) estiman que de 1944 a 2006 fueron afectados 101 aeropuertos de 28 países, al menos 171 ocasiones, por la erupción de 46 volcanes. También revelan que desde 1980 son afectados en promedio cinco aeropuertos al año, lo que demuestra que el riesgo volcánico en aeropuertos no es un fenómeno raro. A diferencia de las zonas pobladas, que tienden a ser más susceptibles a la actividad volcánica conforme más cerca estén de los edificios volcánicos, Guffanti et al. (2009) muestran de manera estadística que los aeropuertos que son afectados por las erupciones volcánicas se localizan más alejados, a más de 500 km de distancia.

La ceniza al inhalarse también puede representar riesgos a la salud tanto a corto como a largo plazo. En este sentido, son comunes los reportes de personas que han experimentado síntomas similares a los producidos por asma después de estar expuestas a una erupción volcánica (Forbes et al., 2003; Horwell y Baxter, 2005).

3.2.4. Gases volcánicos

Los gases disueltos en los magmas son liberados durante la actividad volcánica, en especial durante el apogeo de un evento eruptivo. Los gases volcánicos usualmente contienen vapor de agua, monóxido y bióxido de carbono, y varios compuestos de azufre, cloro, flúor y nitrógeno (Thorarinsson, 1979). Cada uno de estos compuestos presenta diferentes grados de peligro. Por ejemplo, el monóxido de carbono (CO) es tóxico, inodoro y muy inflamable. Sin embargo, por ser más ligero que el aire, puede disiparse y ascender fácilmente hacia la atmósfera. Caso contrario ocurre con el bióxido de carbono (CO₂) que, aunque es menos tóxico que el monóxido de carbono, es más pesado que el aire. Por lo tanto, puede desplazar el aire presente en depresiones y cuencas y sustituirlo, provocando asfixia en personas y animales. Éste fue el caso que experimentaron aproximadamente 1700 personas que vivían en poblados alrededor del lago Nyos (un lago en un cráter volcánico situado al noroeste de Camerún), que murieron súbitamente el 21 de agosto de 1986. Algunos de los supervivientes que se encontraban ese día cerca del lago recuerdan haber escuchado viento, el alboroto de animales y olor a pólvora o a huevo podrido antes de perder el conocimiento. Posteriormente pudo determinarse que su muerte fue debida a la asfixia por inhalación de bióxido de carbono (Baxter et al., 1989), el cual se encontraba disuelto y acumulado en la base del lago (Holloway, 2000). Otros gases volcánicos son también muy venenosos, aunque su presencia puede ser detectada por los olo-

res característicos que poseen, como el olor a huevo podrido del ácido sulfhídrico. También pueden reaccionar formando ácidos que son transportados como aerosoles y que ocasionan quemaduras en los ojos, piel e irritaciones del sistema respiratorio.

Otros de los gases que pueden ser expulsados durante las erupciones volcánicas son los compuestos de azufre (sulfuros), que pueden tener un impacto considerable sobre el clima de una región (Robock, 2000). Un caso histórico es el de la actividad de 8 meses de duración que tuvieron los cráteres Laki en Islandia entre 1783 y 1784, cuyas emisiones tóxicas ocasionaron la muerte del 24% de los habitantes de Islandia y provocaron variaciones climáticas extremas, posiblemente responsables de 20 000 muertes tan solo en Inglaterra (Witham y Oppenheimer, 2004).

3.2.5. Flujos piroclásticos y lahares

Los gases y las partículas sólidas de las nubes expulsadas durante las erupciones volcánicas son conocidos como piroclastos (palabra construida de los vocablos griegos *piros*: fuego, y *clastos*: roto). Los piroclastos de las erupciones plinianas, pueden en conjunto sobrepasar la densidad del aire. Cuando esto ocurre, en lugar de ascender como una columna, fluyen como una emulsión desde el cráter pendiente abajo a velocidades que pueden ser superiores a los 100 km/h (Francis y Oppenheimer, 2004). Estas emulsiones se conocen como **flujos piroclásticos**, y son considerados como el más mortal de los fenómenos volcánicos. Por ejemplo, el evento del 8 de mayo de 1902 del Monte Peleé en Martinica, generó un flujo piroclástico que provocó la muerte de entre 28 000 y 30 000 personas (de Boer y Sanders, 2002).

Bajo ciertas condiciones puede acumularse nieve en la cima de los edificios volcánicos. Si este es el caso, las vibraciones y el calor generado durante una actividad volcánica puede provocar que la nieve se derrita y que el agua resultante se mezcle con material piroclástico para formar **lahares**. Los lahares también pueden formarse por la participación en esa mezcla de agua de lluvia o de lagos formados en cráteres. Los lahares tienen una consistencia similar al concreto húmedo y avanzan a una velocidad similar que una corriente de agua a través de laderas y de las vías naturales de desagüe. El riesgo que los lahares representan se puede ejemplificar con el evento del 13 de noviembre de 1985 del Nevado del Ruíz en Colombia, en el cual murieron casi 25 000 personas, la mayoría de ellas habitantes de la población de Armero (Voight, 1990).

3.2.6. ¿Qué es riesgo volcánico?

La ecuación fundamental que define el riesgo volcánico es: *riesgo = peligro x vulnerabilidad*; en donde **peligro** hace referencia a la probabilidad de que ocurra un fenómeno

volcánico específico, y la **vulnerabilidad** define el grado de pérdida de los elementos expuestos al peligro, como vidas humanas, edificaciones o actividades económicas (Blong, 2000). Para De la Cruz-Reyna y Tilling (2008), esta ecuación fundamental puede ser modificada en una forma más práctica para aplicarla en México de la siguiente manera: $riesgo = peligro \times (vulnerabilidad - preparación)$; donde la **preparación** se refiere a la serie de medidas usadas para reducir la vulnerabilidad. En este sentido, el **riesgo volcánico** consiste en la probabilidad de que en una región específica ocurra cierta manifestación volcánica particular durante un intervalo de tiempo dado.

3.2.7. Percepción del riesgo volcánico

La forma en la que el público, las autoridades, los medios de comunicación y los científicos responden a un fenómeno amenazador, como una erupción volcánica, tendería a ser óptima si compartieran la misma **percepción de riesgo** (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008), que es un juicio subjetivo que las personas hacen acerca de las características y de la severidad del riesgo (Paton et al., 2001). Las erupciones volcánicas suelen tener una ocurrencia mucho menor que otros peligros naturales, por lo que en la mayoría de los casos los individuos raras veces ganan experiencia personal ante tales eventos. Esto puede ocasionar que la percepción de un riesgo volcánico suela presentarse en niveles significativamente bajos (Johnston and Ronan, 2000; Carlino et al., 2008), lo que puede originar un serio problema de gestión de crisis (De la Cruz-Reyna et al., 2000). Por si fuera poco, la percepción pública del riesgo es frecuentemente parcial, en el sentido que la gente suele exagerar el impacto de los eventos espectacularmente grandes y subestimar aquel de los eventos más pequeños (Slovic, 1987). En este sentido, los individuos que presentan una percepción más precisa de su vulnerabilidad son los que están más inclinados a responder de manera más apropiada ante alertas (Lindell, 1994).

3.2.8. Logística de crisis volcánicas en México

Uno de los eventos más desastrosos en la historia reciente de México que pudo ser evitado, fue la erupción de 1982 del volcán Chichón en Chiapas (Tilling, 2009).

Los primeros avisos de esta erupción se presentaron en diciembre de 1981, cuando los habitantes de las inmediaciones del Chichón, al comenzar a experimentar temblores persistentes y fumarolas, pidieron ayuda a los gobiernos estatal y federal. La ayuda no llegó hasta el 28 de marzo de 1982, cuando ocurrió una inesperada erupción que produjo una columna de casi 18 km de altura que obligó a una evacuación apresurada y confusa.

Después de esta erupción, la actividad volcánica disminuyó notablemente y muchos de los evacuados regresaron a sus hogares bajo el permiso de las autoridades.

Lamentablemente, cinco días después, ocurrieron otras dos erupciones más poderosas que la primera que produjeron flujos piroclásticos que arrasaron nueve poblados, matando cerca de 2 000 personas. Un área de 30 000 km² alrededor del volcán fue cubierta por una capa blanquecina de cenizas de al menos 1 mm de espesor.

De esa área, 153 km² quedaron completamente devastados. Además de los flujos piroclásticos y de la dispersión de ceniza, parte del material producido por el volcán Chichón obstruyó el cauce del río Ostuacán y formó una presa que se desbordó el 26 de mayo, casi dos meses después del inicio de la actividad volcánica. Del desborde de la presa se formó un lahar con temperaturas de hasta 60 °C que se desplazó hacia el poblado de Ostuacán. Ese lahar no provocó pérdidas humanas gracias a la intervención del ejército mexicano, que dirigió a los habitantes hacia las partes más altas del lugar (Espíndola y Macías, 1996). La lección aprendida más importante de este episodio según Tilling (2009) fue que, tanto el científico a cargo como las autoridades militares que actuaron bajo su asesoría, no debieron considerar la disminución de la actividad volcánica (entre marzo 29 y abril 2) como una señal de que la erupción había terminado.

Aún con el antecedente de la erupción del volcán Chichón, los primeros esfuerzos para definir la logística para una crisis volcánica en México comenzaron en 1995 con la actividad más reciente del volcán Popocatepetl (CENAPRED-UNAM, 1995). Este volcán ha presentado varios eventos plinianos en los últimos 5 000 años, los más recientes, en 675 D.C. y 1095 D.C., provocaron una devastación considerable en los asentamientos humanos localizados en sus alrededores (Siebe et al., 1996b).

Después de presentar una actividad intermitente de intensidad baja desde el siglo XIV (De la Cruz-Reyna et al., 1995) y de mantenerse inactivo por casi seis décadas, el Popocatepetl reinició un nuevo ciclo de actividad en 1994 que obligó la evacuación de cerca de 75 000 personas ubicadas en el flanco oriental del volcán (Broad, 1996).

Una de las características del volcán Popocatepetl que obligó definir la logística para una crisis volcánica, es que es considerado como uno de los diez volcanes en el mundo con mayor cantidad de habitantes en sus alrededores (Small y Naumann, 2001). Las áreas más densamente pobladas al norte del volcán, en donde se localiza la Ciudad de México de aproximadamente 8.9 millones de habitantes, pueden ser afectadas significativamente por caída de cenizas (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008). Otras áreas vulnerables son la ciudad de Puebla de Zaragoza, ubicada a 45 km al este del Popocatepetl, con una población de 3 millones de habitantes; y el estado de Morelos, que incluye las áreas metropolitanas alrededor de Cuernavaca (818,000 habitantes) y Cuautla (150 000 habitantes); esta última ciudad ubicada dentro de la trayectoria de flujos de escombros (Siebe et al., 1995).

Al oeste del volcán también se encuentran vulnerables a los efectos directos de una erupción mayor alrededor del 1.5 a 2% de la población del Estado de México, que alcanza cerca de 16.2 millones de habitantes.

La logística para una crisis volcánica, además de involucrar la cooperación mutua de vulcanólogos, autoridades civiles y público en general (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008), debe incluir tres procesos principales mencionados por De la Cruz-Reyna et al. (2000).

El primero consiste en la identificación de las áreas que se encuentran amenazadas por un volcán específico. Es durante este proceso que se define la probabilidad de que un evento peligroso pueda ocurrir durante cierto intervalo de tiempo. Esto permite una visión estática de los peligros potenciales que poseen los volcanes, la cual suele representarse con mapas de peligro por zonas (Fig. 4).



Fig. 3.4. Mapa de peligro por flujo de material volcánico del volcán Popocatepetl según el reporte publicado el 18 de abril de 2017 por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED; <http://www.cenapred.gob.mx/reportesVolcan/BuscarReportesVolcan?optBusqueda=1>). Los triángulos rojos representan las estaciones a través de las cuales se monitorean los volcanes. La zona roja que cubre al volcán representa el Área 1 de mayor peligro, que podría ser afectada por derrames de lava, flujos piroclásticos, flujos de lodo e inundaciones producidas por erupciones similares a las que han ocurrido al menos dos veces en los últimos 1,000 años. Según la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), en 2015 más de 650 000 personas se localizaban dentro de esta área (<http://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/plan-de-operaciones-volcan-popocatepetl>). La zona en color mostaza representa el Área 2 de peligro moderado, con un peligro similar al Área 1 aunque menos frecuente (al menos diez veces en los últimos 15 000 años). La zona amarilla representa el Área 3 de menor probabilidad que el evento eruptivo alcance esta zona. Este tipo de erupciones han ocurrido al menos dos veces en los últimos 40 000 años. Este mapa también incluye el peligro por caída de productos balísticos y caída de cenizas.

El segundo proceso consiste en el monitoreo en tiempo real durante un período pasivo del volcán, para documentar los cambios de distintos parámetros que podrían asociarse al peligro potencial. Como ejemplo de uno de estos parámetros está el incremento en el contenido de dióxido de carbono (CO_2) de las fumarolas, que pueden asociarse a la incorporación de nuevo magma a la cámara magmática, o de dióxido de azufre (SO_2), que puede indicar la presencia de magma cerca de la superficie. Los datos obtenidos durante el monitoreo de los volcanes contribuyen a la estimación de la probabilidad de ocurrencia de escenarios específicos. El grado de certidumbre de tales estimaciones depende de la cantidad y calidad de los datos obtenidos. También depende del intercambio de las opiniones e ideas entre la comunidad científica que gestiona e interpreta esos datos, y de su facultad para llegar a un consenso.

El tercer proceso necesario para la logística de una crisis volcánica consiste en el desarrollo e implementación de sistemas de advertencia y respuesta, que permitan tanto a las autoridades civiles como a la población vulnerable, a adoptar medidas de mitigación de acuerdo con niveles de riesgo preestablecidos.

3.3. Inestabilidad de laderas

3.3.1. ¿Qué es una ladera inestable?

Una **ladera** es el área de declive de cualquier zona alta o accidente topográfico, como un cerro o una montaña. Cuando el suelo y/o roca que conforma una ladera no está fijo, se dice que la ladera se encuentra inestable. La inestabilidad de laderas representa uno de los riesgos geológicos más comunes en las zonas urbanas. Cada día se reportan deslizamientos, derrumbes y flujos, por mencionar algunos, que amenazan la vida, la salud y los bienes materiales de las zonas urbanas y rurales a nivel global. De los factores que pueden influir en la ocurrencia de estos fenómenos se puede mencionar la baja resistencia que pueda tener el material que conforma las laderas a deslizarse, o la presencia de estructuras que debiliten el material, como fallas y fracturas. Otro factor importante es la erosión del material producida por lluvias excesivas y terremotos (Alcántara-Ayala et al., 2008).

Para que una ladera se vuelva estable deben ocurrir ciertos **procesos de equilibrio**, que consisten en el desprendimiento y transporte del material que conforman las zonas inestables de la ladera hacia otras zonas de mayor estabilidad y menor altura. Estos procesos de equilibrio pueden clasificarse en deslizamientos, flujos, extensiones laterales, caídos y vuelcos según los criterios expuestos por Varnes (1978). La combinación de dos o más de estos tipos de movimiento suele nombrarse como movimiento complejo. Tales procesos de equilibrio han sido reportados,

descritos y estudiados en literatura especializada en inglés, por lo que se incluye entre paréntesis la traducción de alguno de los términos técnicos del que se haga referencia.

3.3.2. Deslizamientos

Los **deslizamientos** (*slides*) hacen referencia al desplazamiento de una masa de suelo o roca a través de una **superficie de ruptura**; bajo el entendimiento que una superficie de ruptura consiste en una zona relativamente estrecha o de varias superficies visibles o razonablemente inferidas. Las distintas partes que conforman un deslizamiento se muestra en la Fig. 5.

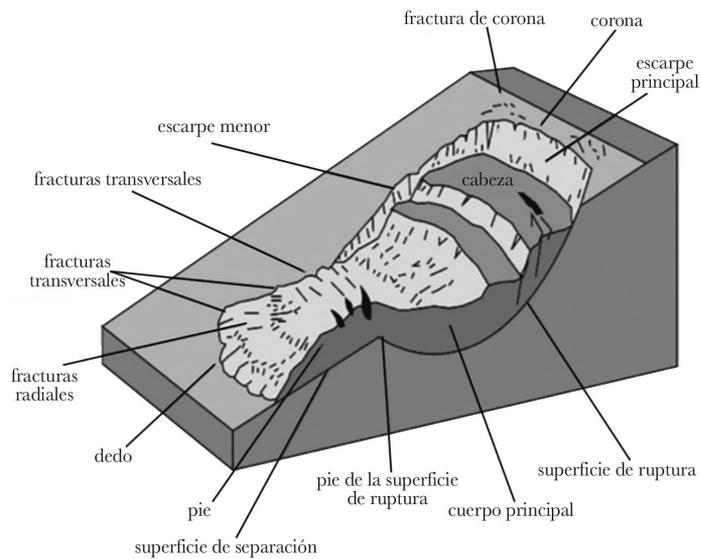


Fig. 3.5. Nomenclatura comúnmente usada para etiquetar las partes de un deslizamiento. Modificado de Highland y Johnson (2004).

Cuando la superficie de ruptura no ocurre al inicio, sino más bien se propaga desde un área de falla local, se dice que el desplazamiento es progresivo. El material desplazado puede deslizarse más allá de la superficie de ruptura original, lo que provocaría que la superficie de ruptura original se transforme en una **superficie de separación**.

Los deslizamientos pueden subdividirse en rotacionales o traslacionales. Los **deslizamientos rotacionales** pueden describirse a través de la dinámica de los corrimientos. Los **corrimientos** (*slumps*) son deslizamientos a lo largo de una

superficie de ruptura curva, con geometría cóncava hacia arriba, que suele ocurrir en materiales predominantemente homogéneos (Fig. 6A)

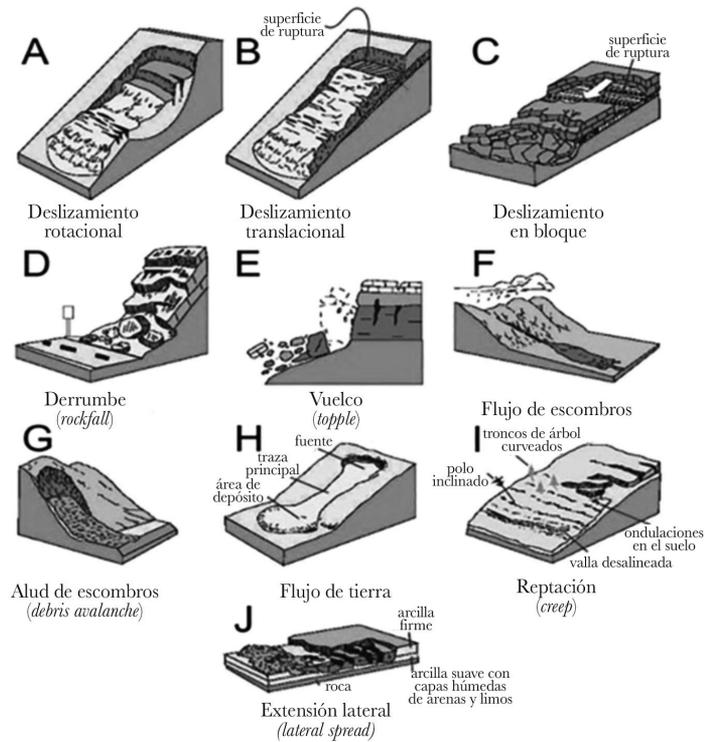


Fig. 3.6. Dibujos esquemáticos de los principales tipos de deslizamientos. Dirigirse al texto para detalles. Modificado de Highland y Johnson (2004)

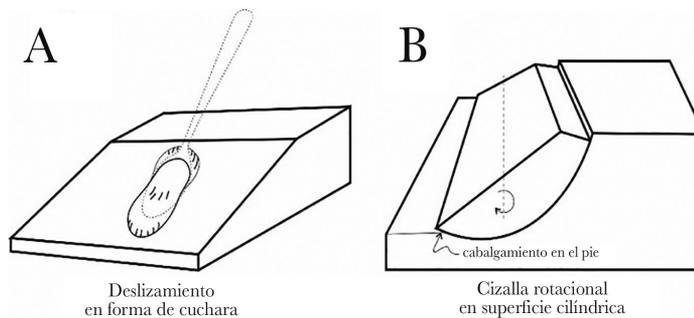


Fig. 3.7. Falla de pendientes en materiales uniformes en forma de cuchara.

Las fracturas expuestas en los corrimientos son concéntricas en planta y cóncavas hacia la dirección del movimiento (Fig. 5). La superficie de ruptura de muchos corrimientos, al igual que los escarpes expuestos, suelen tener forma de “cuchara” (Fig. 7A). Si el deslizamiento se extiende una distancia considerable, la superficie de ruptura puede semejar un sector de cilindro, cuyo eje axial es transversal a la pendiente (Fig. 7B).

En el área de la cabecera, el movimiento es predominantemente hacia abajo con una pequeña rotación aparente. Sin embargo, la superficie superior de la masa deslizada suele separarse en unidades, las cuales pueden bascularse hacia atrás o delante con respecto a la pendiente. La forma de la superficie suele estar influida por discontinuidades preexistentes en el material, como la estratificación, fallas y fracturas. El escarpe en la cabecera de un corrimiento es casi vertical. Si la masa principal del deslizamiento se aleja mucho de su posición original y el escarpe queda sin soporte, podría ocurrir una nueva falla en la corona del deslizamiento. La incidencia de agua de lluvia o de alguna escorrentía en la cabecera de un corrimiento, filtrada entre las unidades basculadas o entre las irregularidades de la topografía, permitirá que el corrimiento se mantenga constantemente húmedo. De esta manera, la acción tanto de la sucesiva creación de escarpes de pendiente abrupta, como de filtración de agua, promoverá la generación de nuevas áreas de inestabilidad. Como resultado, los corrimientos pueden continuar intermitentemente su deslizamiento hasta producir pendientes estables con inclinaciones muy bajas.

En los **deslizamientos traslacionales** la masa se mueve a lo largo de una superficie más o menos plana, con una componente mínima del movimiento rotacional o del basculamiento hacia atrás tan característicos de los corrimientos (Fig. 6B). El movimiento del material está, por lo tanto, controlado por superficies de debilidad, como lo pueden ser fallas, fracturas, contactos entre estratos de roca o cubiertas de suelo. También puede estar controlado por las variaciones de la resistencia a la cizalla presente en las zonas entre los estratos.

Durante los deslizamientos traslacionales el material suele deslizarse hacia afuera de la superficie del suelo. Su deslizamiento puede continuar si la superficie donde descansa el material está suficientemente inclinada, y perdurar de manera indefinida mientras los valores de la resistencia a la cizalla en la misma superficie permanezcan suficientemente bajos. Aquellos deslizamientos traslacionales en donde el material en movimiento consiste en una unidad singular, o en unidades ligeramente espaciadas que se desplacen pendiente abajo como una masa relativamente coherente, se define como **deslizamiento en bloque** (*block slide*) (Fig. 6C). Si el material en movimiento consiste en unidades semi-independientes, se le refiere como **deslizamiento quebrado** (*broken slide*). En este caso, es probable

que el aumento de la velocidad del desplazamiento o de la presencia de agua permita que continúe la deformación y desintegración entre unidades para generar un cambio progresivo de “deslizamiento quebrado” a “flujo”.

3.3.3. Flujos

Los **flujos** (*flows*) son desplazamientos de material que experimenta esfuerzos de cizalla a lo largo de toda su extensión. Pueden ocurrir superficies de deslizamiento por medio de las cuales ocurra el movimiento dentro de la masa, pero éstas no suelen ser visibles o tienen una vida corta. Por su parte, la frontera entre la masa en movimiento y el material que permanece fijo (*in-situ*) puede estar definida por una superficie bien definida en donde ocurre un movimiento diferencial o por una zona de cizalla. La generación de flujos generalmente requiere la presencia de agua. Dependiendo del material involucrado, los flujos pueden clasificarse en flujo de estratos de roca (*bedrock*; Prost, 1998), flujo de tierra (*earth flow*) y flujo de escombros (*debris flow*).

El movimiento en los *flujos de estratos de roca* involucra deformaciones distribuidas a largo de muchas fracturas o microfracturas. El movimiento suele ser extremadamente lento y constante en el tiempo, de tal manera que la deformación de los estratos de roca se manifiesta con un comportamiento plástico. Este tipo de movimiento puede ser reconocido en áreas de alto relieve.

El movimiento de los **flujos de tierra** y de los **flujos de escombros** es más sencillo de reconocer con respecto a los estratos de roca porque los desplazamientos dentro de su masa suelen ser mayores. Los **flujos de escombros** se diferencian de los **flujos de tierra** en que el primero contiene un porcentaje alto de fragmentos gruesos, mientras que el segundo contiene el 50% o más de partículas del tamaño de arenas, limos y arcillas. Los flujos de escombros suelen generarse por precipitaciones inusualmente intensas o por el deshielo de nieve o suelo congelado. Su generación puede favorecerse por la remoción de cubierta vegetal por incendios. Los flujos de escombros usualmente siguen caminos de drenaje preexistentes. Tienen una densidad alta de sólidos (60-70 %) con respecto al peso de la masa y pueden extenderse por varios kilómetros, hasta descargarse en un valle de pendiente suave o en la base de un frente montañoso (Fig. 6F). Como ejemplo del efecto que pueden tener las precipitaciones intensas sobre la generación de flujos de escombros se pueden citar las lluvias en la franja costera de Venezuela que ocurrieron en diciembre de 1999. Esas lluvias fueron tan extraordinarias que del 2 al 3 de diciembre acumularon 200 mm, y fueron seguidas de una tormenta que produjo 911 mm de lluvia del 14 al 16 de diciembre (Larsen et al., 2006). Además de causar inundaciones, las lluvias destruyeron o dañaron 8000 residencias

individuales y 700 departamentos, además de afectar caminos, cableado telefónico y sistemas eléctricos y de drenaje (Salcedo, 2000). El agua infiltrada en el suelo durante este período saturó y reblandeció el suelo, provocando inestabilidad en las laderas. De tales inestabilidades fueron inducidos miles de deslizamientos en la Cordillera de la Costa, Vargas, que afectaron un área densamente poblada localizada en la base de las montañas y provocaron la muerte de cerca de 700 personas (Altez y Revet, 2005). Las pérdidas materiales ascendieron a 1.79 billones de dólares (Salcedo, 2000). También se reportó un alto nivel de deforestación y un cambio evidente en pendientes y cañadas, y en la morfología de los abanicos aluviales (Larsen et al., 2006).

Los flujos de tierra y de escombros pueden formar parte de los **deslizamientos por licuefacción** (*flow slides*), que son característicos de una falla repentina que provoca un derrame (*runout*) rápido y extenso sobre un terreno de pendiente suave u horizontal. El material desplazado experimenta licuefacción (que implica el cambio de estado sólido a líquido de sedimentos sin cohesión saturados de agua). Además, no suele tener cohesión, tiene poca cementación y presenta invariablemente una alta porosidad (Hutchinson, 1992; Hungr et al., 2001). Un ejemplo de un deslizamiento por licuefacción fue el acontecido en el barranco Las Colinas como respuesta al sismo del 13 de enero de 2001 (Mw 7.6) en El Salvador. Durante este episodio se derramaron cerca de 130 000 m³ de material a lo largo de 735 m a una velocidad aproximada de 16 m/s sobre el área residencial de Santa Tecla, provocando la muerte de ~585 personas (Evans y Bent, 2004).

Existe una progresión completa entre los “deslizamientos” de escombros y los “flujos” de escombros dependiendo del contenido de agua y de su movilidad. También existe una progresión completa entre los “deslizamientos” de escombros y los “aludes” de escombros conforme el movimiento es cada vez más rápido, ya sea debido a un mayor contenido de agua o a que la pendiente sea cada vez más pronunciada.

En los **deslizamientos de escombros** el movimiento es usualmente lento. El material en movimiento puede incluir bloques volcados en la corona que se fracturan progresivamente en partes cada vez más pequeñas conforme avanzan hacia el pie del deslizamiento (Fig. 5). El fracturamiento progresivo de los **aludes de escombros** es más rápido y la masa experimenta licuefacción, ya sea por su alto contenido de humedad o por deslizarse en pendientes más abruptas. El flujo de los aludes cae a lo largo de un canal de corriente y su avance puede superar el pie de la pendiente (Fig. 6G). Los **aludes de escombros** por lo general adquieren una geometría larga y estrecha. Suelen dejar una cicatriz cuesta arriba hacia la cabecera en forma de “V” cuando el alud inicia en una ladera maciza que no se encuentre

previamente fracturada; en contraste con el escarpe en forma de “herradura” de una **volcadura**.

Los **flujos de tierra** (Fig. 6H) pueden presentar una gran variedad tanto de formas, como de contenido de agua (desde la saturación hasta estar esencialmente secos) y de velocidades (desde extremadamente lentas hasta extremadamente rápidas). El extremo húmedo de los flujos de tierra se conocen como **flujos de lodos** (*mudflows*; Paton, 1998), que consisten en una suspensión conformada en su mayoría por partículas finas, o por arenas y limos saturados de agua.

Otros tipos de flujos pueden ocurrir en ambientes subacuáticos (debajo del agua). Por ejemplo, Andresen y Bjerrum (1948) describen los **flujos de deslizamiento retrogresivo**, los cuales ocurren en estuarios costeros a lo largo de bancos de arena o limo. Los flujos de deslizamiento retrogresivo pueden estar sujetos a escurrimientos y al constante aumento y caída de la marea, lo que promueve que la presión de sus poros, saturados de agua, fluctúe de manera repetida. De esta manera, cuando la estructura de arena suelta distribuida a lo largo de la sección de un banco de arena colapsa, la arena fluye rápidamente hacia la parte inferior del banco y se extiende a través de numerosos planos de deslizamiento (Fig. 8).

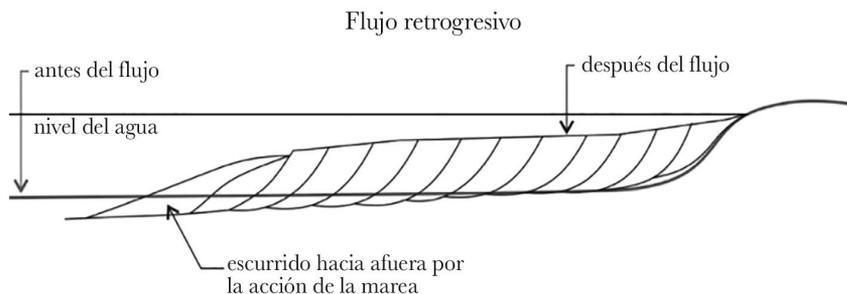


Fig. 3.8. Esquema del aspecto de un banco de arena antes y después de un flujo retrogresivo. Modificado de Koppejan et al. (1948)

Es también en materiales presentes en ambientes subacuáticos en donde los **flujos de tierra** pueden alcanzar velocidades altas. La **sensibilidad** es un término aplicable a partículas finas (arcillas) que hace referencia a la variación de su consistencia cuando es trabajada o remodelada. Tal fenómeno puede observarse cuando un tractor se desplaza por encima de un suelo blando. Este fenómeno puede definirse como la relación entre la resistencia a la compresión del suelo no perturbado y la resistencia a la compresión del suelo remodelado (Smith y Evans, 1949). Durante los flujos de tierra a altas velocidades, el material total

en movimiento puede incluir fracturas generadas por expansión lateral, flujo retrogresivo y licuefacción.

Aunque el término “flujo” suele involucrar agua, también pueden ocurrir flujos “secos” de material granular (limos, arenas y gravas). Un ejemplo son los **ríos de piedra** (*block streams*; Kotlyakov y Komarova, 2006), que consisten en la acumulación de escombros rocosos en forma de “lengua” sobre estratos de roca o suelo. Suelen presentarse en las cabeceras de las cañadas y pueden extenderse hacia bosques o rellenar pequeños valles. No presentan partículas finas en la parte superior, porque éstas suelen ser lavadas y transportadas por las lluvias. Su pendiente no suele ser mayor a 40°.

3.3.4. Extensión lateral

Durante la **extensión lateral** (*lateral extension*), el material de la zona inestable, en lugar de desplazarse de un sitio a otro, se extiende en dirección horizontal a través de fracturas de tensión o de cizalla. Este proceso suele ser extremadamente lento y puede llevarse a cabo a kilómetros de distancia sobre terrenos planos o de pendientes muy suaves (Fig. 6J).

Se pueden distinguir dos tipos de extensión lateral. En el primero, los desplazamientos del material resultan en una extensión general sin que se pueda distinguir en la base de la cizalla una superficie bien definida. El segundo tipo involucra la licuefacción o el flujo plástico de la masa que se encuentra por debajo del material que experimenta la extensión lateral. Como resultado, el material superior que descansa encima de esa masa inferior es la que experimenta extensión lateral como una unidad coherente (como lo son los estratos de roca y ciertos suelos) a través de fracturas. Las fracturas que permiten la extensión lateral hacen que la unidad coherente se separe en bloques, los cuales pueden ser rellenados tanto por la masa inferior exprimida hacia arriba, como por detritos provenientes de otras fuentes. Una vez fracturado, el material superior puede experimentar subsidencia, translación, rotación, desintegración o licuefacción y flujo. Este segundo tipo de extensión lateral usualmente es disparado por movimientos rápidos en la tierra, como los pueden ocasionar los terremotos. Cuando se involucran materiales conformados por partículas finas en pendientes suaves, el fracturamiento inicia de manera repentina en un área pequeña y se extiende rápidamente.

3.3.5. Caídos

Los **caídos** (*falls*) son otro tipo de proceso de equilibrio en donde una masa de cualquier tamaño es desprendida de una superficie desde una pendiente abrupta o acantilado, involucrando un desplazamiento de cizalla mínimo o nulo. La masa

al desprenderse descendiendo a velocidades altas a muy altas, ya sea en caída libre, rodando o dando saltos. Un caso del proceso de caída son los **derrumbes** (*rock falls*), en donde la masa desprendida proviene de estratos de roca (Fig. 6D). Otro caso son los **desprendimientos de escombros** (*debris falls*), en donde la masa desprendida proviene de pedazos de roca previamente fragmentados.

3.3.6. Vuelcos

Un **vuelco** (*topple*) consiste en la rotación hacia delante de una o varias unidades, bajo la acción de la gravedad o de fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos en grietas. El eje de la rotación hacia delante ocurre a través de un punto de pivote localizado debajo de la (s) unidad (es) involucradas (Fig. 6E). Los vuelcos pueden o no culminar en desprendimientos o deslizamientos, dependiendo de la geometría de la masa y la orientación y extensión del terreno en la cual ocurra.

3.3.7. Factores que influyen en la inestabilidad de las laderas

De acuerdo con Cuenalo-Campos et al. (2011), los factores que influyen en la inestabilidad de las laderas se pueden dividir en “condicionantes”, que hacen referencia a las características intrínsecas de las laderas, y “desencadenantes”, que están asociados a fenómenos externos.

Los **factores condicionantes** son cuatro. 1) La topografía, en donde a mayor pendiente, menor resistencia a la cizalla y, por lo tanto, al deslizamiento.

De manera similar, a mayor altura, mayor influencia de la fuerza de la gravedad y, por lo tanto, mayor tendencia al deslizamiento. 2) La geología superficial, que incluye varios parámetros que tienen una influencia considerable en la resistencia al deslizamiento del material en la zona inestable, como el tipo de roca, la intensidad de la meteorización, la presencia de grietas, fallas y fracturas, la orientación de los horizontes estratigráficos, la porosidad y permeabilidad del material, al igual que las propiedades mecánicas de las rocas. 3) Las condiciones hidrogeológicas, que están definidas por la cantidad y la distribución del agua en la zona inestable.

Este factor es muy importante porque la presencia de agua hace que se incremente tanto la presión entre los intersticios de la roca y/o del suelo, como el peso volumétrico del suelo, disminuyendo así su resistencia al deslizamiento. 4) La vegetación, porque las raíces suelen fijar los suelos más superficiales al terreno, incrementando así su resistencia al deslizamiento y atenuando su erosión.

Los **factores desencadenantes** son seis. 1) Las lluvias, que al infiltrarse en el suelo pueden ocasionar tanto la disolución de los cementantes de las rocas y de los suelos, como la desaparición de la capilaridad que mantienen unidas a las partículas; además de influir directamente en las condiciones hidrogeológicas. 2)

Los terremotos, que producen vibraciones en el terreno que pueden desencadenar la inestabilidad de laderas y todo tipo de procesos de equilibrio (secciones 3.2-3.6). 3) La congelación y el deshielo, que producen continuas contracciones y dilataciones que generan fisuras y grietas en las rocas presentes en regiones de bajas temperaturas. 4) Las erupciones volcánicas que: a) producen nuevo material (lava) que se desplaza pendiente abajo desde los cráteres, b) generan suficiente calor en los alrededores de los cráteres que puede provocar el deshielo en las regiones de bajas temperaturas, y c) producen vibraciones en el terreno. 5) La erosión, que involucra la acción de ríos y oleaje que socavan el material localizado en el pie de las laderas, o que puede romper súbitamente el embalse de un río. 6) La actividad humana que: a) por excavaciones generadas para la construcción de caminos, presas, minas, etc., llega a modificar la geometría de laderas; b) por la construcción de estructuras, terraplenes, rellenos, etc., altera las condiciones hidrogeológicas y el flujo natural de los escurrimientos; y c) por deforestación puede disminuir la resistencia al deslizamiento e incrementar la susceptibilidad de los suelos a la erosión.

3.3.8. Indicadores antecedentes y potenciales

El desencadenamiento de movimientos que definen los procesos de equilibrio en las laderas inestables suelen producir modificaciones en las características del terreno. De esta manera, la identificación de esas modificaciones, ya sea directamente sobre el terreno o a través de fotografías aéreas e imágenes satelitales, permite identificar las zonas que ya han experimentado una inestabilidad.

Esas modificaciones son referidas por MET-ALARN (2005) como **indicadores antecedentes**. Un claro ejemplo de un indicador antecedente son los **abanicos aluviales**, que consisten en depósitos sedimentarios en forma de triángulo o abanico generados por la interacción entre las escorrentías de agua y las laderas de montañas, cerros y cañones. Cuando la lluvia cae sobre accidentes topográficos, el agua tiende a escurrir por la acción de la fuerza de gravedad a través de cañadas más o menos bien establecidas. Al caer, parte del agua escurre pendiente abajo, transportando y depositando gravas, arenas y limos. La fuerza de gravedad que promueve esto también es responsable de los movimientos provocados por la inestabilidad de laderas, por lo que las trayectorias de las escorrentías de agua y de los deslizamientos, flujos y caídos tienden a ser similares. Teniendo esto en cuenta, los abanicos aluviales en las zonas urbanas y rurales pueden representar sitios de peligro geológico inducido por lluvia (e.g., Campbell et al., 1975) y su estudio representa una gran oportunidad para su prevención.

MET-ALARN (2005) también hacen referencia a **indicadores potenciales** como aquellas observaciones que permiten identificar las áreas que, aunque no hayan

sido afectadas por algún proceso de equilibrio, presentan características que sugieren inestabilidades. Estos mismos autores enlistan varios indicadores para los deslizamientos (Tabla 3.1), los derrumbes (Tabla 3.2) y los flujos de escombros (Tabla 3.3).

Tabla 3.1. Criterios para la identificación de deslizamientos según MET-ALARN (2005)

Indicadores por su naturaleza	Indicadores antecedente	Indicadores potenciales
Geomorfológicos	Terreno con pequeñas depresiones, relieve ondulado o con presencia de escarpes y/o contrapendientes	Terreno con pequeñas depresiones, relieve ondulado o con grietas en crecimiento
Geológicos	Nichos de arranque con afloramientos de rocas alteradas	Fracturas paralelas a la pendiente, rocas alteradas, material poco consolidado o deleznable
Hidrogeológico	Abundancia relativa de agua en zonas con mayor vegetación o mayor verdor, saturación de suelos, variación en el gasto de los manantiales, aparición de pantanos en las cabeceras, en la parte media o al pie de los deslizamientos	Suelos húmedos o mojados durante un tiempo continuo
Vegetación	Presencia de plantas típicas de zonas húmedas, troncos torcidos y/o inclinados, raíces tensas o rotas, discontinuidades marcadas en la cobertura vegetal, etc.	Presencia de plantas típicas de zonas húmedas, de raíces tensas y de dobles en la parte baja de los troncos de árboles
Estructurales	Postes inclinados, cables tensos o flojos, construcciones agrietadas o inclinadas, grietas u ondulaciones en los pavimentos, cercos desplazados, etc	
Toponimia	Nombres de lugares que pueden sugerir inestabilidad del terreno como Cerro de Agua, Cerro Partido, Ojo de Agua, Salsipuedes, etc.	
Históricos	Testimonios o documentos de eventos pasados	

Tabla 3.2. Criterios para la identificación de derrumbes según MET-ALARN (2005)

Indicadores por su naturaleza	Indicadores antecedente	Indicadores potenciales
Geomorfológicos	Presencia de abanicos aluviales o de depósitos de acumulación al pie de las laderas	Zonas rocosas o acantilados de pendiente abrupta
Geológicos	Afloramientos de rocas fuertemente fracturadas o alteradas	

Indicadores por su naturaleza	Indicadores antecedente	Indicadores potenciales
Vegetación	Ausencia de cubierta vegetal en zonas activas o exceso de cubierta vegetal en zonas inactivas	Presencia de árboles sobre zonas rocosas
Toponimia	Nombres sugestivos de lugares como: El Derrumbadero, El Pedregal, Las Piedras, etc.	
Históricos	Testimonios o documentos de eventos pasados	

Tabla 3.3. Criterios para la identificación de flujos de escombros según METALARN (2005)

Indicadores por su naturaleza	Indicadores antecedente	Indicadores potenciales
Geomorfológicos	El escarpe principal tiene forma cóncava con flancos curvos, presenta estructuras de flujo y se pueden diferenciar fragmentos al pie de la colada	Suelos sobre utilizados en pendientes mayores al 30% con partículas de grano medio a grueso, en donde los usuarios no tienen prácticas de manejo y conservación de suelos
Geológicos	El escarpe principal tiene forma curva, circular o de botella, y el cuerpo es alargado. El material movilizado es predominantemente arcilloso	Suelos sobreutilizados en pendientes mayores al 30% con partículas de grano medio a fino, en donde los usuarios no tienen prácticas de manejo y conservación de suelos
Hidrogeológico	El escarpe principal tiene forma en “V” y comúnmente presenta estrías. El material movilizado se compone de escombros de rocas y árboles embebidos en una matriz de arena y arcilla. Su parte inferior es alargada con poca profundidad	Suelos de grava en pendientes mayores al 50%, embebidos en una matriz de tamaño de grano variable, como lo pueden ser los potreros para pastoreo o para agricultura

Alcántara-Ayala Et al. (2008) también mencionan observaciones que puede fungir como indicadores potenciales y que permiten determinar con cierta precisión la magnitud del riesgo:

a) El incremento de humedad en el suelo, que a su vez puede manifestarse con un incremento en la infiltración de agua, en la saturación de los suelos o en el desarrollo de manantiales en áreas que no suelen ser húmedas.

b) El aumento súbito del nivel del agua de un arroyo, posiblemente acompañado por un aumento en la turbidez del agua.

- c) El descenso súbito del nivel del agua en los arroyos, a pesar de que esté lloviendo o de que haya llovido recientemente.
- d) La generación de nuevas fisuras o deformaciones en asfalto, pavimento, adoquinado, empedrado, etc., o el aumento de las ya existentes.
- e) La inclinación de árboles y de estructuras verticales como muros y postes.
- f) La inclinación y/o agrietamiento de pisos y cimentaciones de concreto.
- g) El movimiento de suelos que dejan expuestas las cimentaciones de estructuras.
- h) El movimiento de estructuras secundarias o añadidas, como terrazas o marquesinas, con respecto a la estructura principal.
- i) La ruptura de tubos de agua y otras estructuras subterráneas.
- j) El hundimiento súbito de carreteras.
- k) El desajuste de marcos que impide que puertas y ventanas cierren con facilidad.

3.3.9. Casos de estudio de problemas de inestabilidad de laderas

Dos casos mencionados por Alcántara-Ayala et al., (2008) pueden ejemplificar la influencia de la inestabilidad de laderas en zonas urbanas.

El primer caso está asociado a los cientos de movimientos de ladera que ocurrieron en la Sierra Norte de Puebla debido a las fuertes lluvias de octubre de 1999. La ciudad de Tezuitlán, Puebla, fue especialmente susceptible a este fenómeno, debido a que está asentada en un área de lomeríos con distintas pendientes sobre tobas (Mendoza et al., 2000), las cuales son rocas relativamente blandas que producen suelos de resistencia al corte variable (Marsal y Mendoza, 1985).

De esta manera, el 5 de octubre de ese año un movimiento en la ladera posterior al cementerio municipal, ubicado en la Colonia La Aurora, tuvo consecuencias catastróficas. Según observaciones de campo hechas inmediatamente después del evento, la masa fallada experimentó un deslizamiento rotacional en la parte cercana a la corona, con una componente traslacional a lo largo del cuerpo principal (Mendoza et al., 2000), sugiriendo que el movimiento inició como un deslizamiento, pero se convirtió posteriormente en un flujo de lodo (Fig. 3.9).

Análisis posteriores mostraron que al saturarse de agua el suelo de esa ladera disminuyó su cohesión. Estos flujos de lodo provocaron la muerte de más de cien personas y cuantiosos daños económicos.

El segundo caso tuvo su origen durante la madrugada del día 9 de octubre de 1997, cuando el huracán *Pauline* causó en Acapulco la peor tragedia registrada en su historia.

La lluvia alcanzó 400 mm en tan solo cinco horas, lo que ocasionó la saturación de los suelos localizados en las partes más altas de los cerros en donde se asienta

la ciudad. La saturación de estos suelos provocó la generación de derrumbes de laderas locales y un movimiento complejo que consistió en caídos, deslizamientos y flujos.

El movimiento complejo se desplazó pendiente abajo. El primer sitio en donde la pendiente se volvía más suave se encontraba justo antes de entrar a la zona urbana, lo que provocó que el movimiento complejo se detuviera y que el material se acumulara. Esta acumulación permitió que quedaran atrapados los fragmentos de roca de mayor tamaño. Aun así, el resto del material continuó su movimiento pendiente abajo con un gran potencial erosivo.



Fig. 3.9. Deslizamiento en la Colonia La Aurora, Teziutlán, Puebla, Octubre de 1999. Imagen tomada de la página del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED; <http://cenapred.mx/es/dirInvestigacion/subDinamicaSuelos/Estructura/Laboratorio/>)

3.3.10. Medidas preventivas

De acuerdo con Alcántara-Ayala et al. (2008), el primer paso para reducir los efectos dañinos causados por la inestabilidad de laderas y los subsecuentes procesos de equilibrio consiste en difundir el conocimiento de los mismos y fomentar la cultura acerca de sus riesgos. Un conocimiento crítico para fomentar la mitigación de los riesgos geológicos asociados a los mismos son los indicadores antecedentes y los indicadores potenciales, usados para identificar las zonas de inestabilidad y diagnosticar su influencia. De acuerdo con los mismos autores, también es importante conocer las medidas preventivas que se pueden tomar para reducir el

riesgo asociado a la inestabilidad de laderas en las zonas urbanas como las enlistadas a continuación:

- a) No destruir la vegetación natural de una región.
- b) No excavar las laderas de los cerros en forma de cortes o terrazas sin autorización.
- c) Impedir la infiltración del agua en el suelo cuando se reside en un terreno inclinado.
- d) Avisar a las autoridades correspondientes sobre la presencia de una fuga de agua para agilizar los trabajos de reparación e impedir así que se reblandezca el terreno.
- e) Mantenerse atento a la información turnada por las autoridades correspondientes durante temporada de lluvias.
- f) Revisar constantemente las paredes, pisos y techos en busca de grietas o hundimientos en casas localizadas en la ladera de un cerro.

Estos mismos autores comentan que la única acción que permite reducir los efectos por inestabilidad de laderas es la detección oportuna y la toma inmediata de decisiones, a fin de poner en práctica planes de evacuación y salvamento previamente diseñados para cada localidad.

3.4. Subsistencia

La **subsistencia** consiste en la reducción gradual o repentina de la elevación de un terreno como consecuencia de la remoción de soporte del subsuelo. Las formas en las que ocurren las subsidencias son muy variables, desde la subsidencia regional de una zona extensa hasta un colapso local. Las subsidencias regionales pueden incrementar el riesgo de una zona a inundarse, en especial de las zonas costeras. Los colapsos locales pueden dañar edificios, caminos y servicios públicos. Independientemente de su escala, este proceso es irreversible.

Aunque el potencial de pérdida de vidas humanas se incrementa en áreas inundables, la subsidencia tiende a representar un mayor riesgo para la propiedad que para la vida. Las causas de la subsidencia según la NRC (1991) incluyen: a) la minería de carbón, yacimientos metálicos, calizas, sal y sulfuros; b) la extracción de agua subterránea, petróleo y fluidos geotérmicos; c) el desagüe de suelos orgánicos; d) la extracción de agua subterránea en rocas calizas y evaporitas; e) la humedecimiento de depósitos secos de baja densidad, conocido como hidrocompactación; f) la compactación de sedimentos; g) el derretimiento de permafrost, que es el suelo de las regiones muy frías que se encuentran permanentemente congelados; h) la licuefacción; y i) la deformación de la corteza.

La subsidencia es un problema global cada vez más común en las zonas urbanas en el que el ser humano tiene una influencia crítica sobre su generación. Por ejem-

plo, cerca del 80% de los casos de subsidencia reportados en Estados Unidos son consecuencia del impacto humano en el agua subterránea (Galloway et al., 1999). Además de la extracción del agua subterránea, en esta sección se describirán rápidamente el desagüe de suelos orgánicos y los sumideros como las causas de la subsidencia.

3.4.1. Extracción de agua subterránea

La causa más común de subsidencia es la compactación de sistemas de **acuíferos no consolidados** (que son depósitos de sedimentos permeables localizadas debajo del terreno, en donde se almacena y circula agua), usualmente acompañado de una extracción excesiva de agua subterránea (Galloway et al., 2000a).

Por ejemplo, la extracción de agua subterránea ha permitido que el Valle de San Joaquín sea la región agrícola más productiva en California, pero también es responsable de que haya experimentado una subsidencia que, de 1926 a 1970, llegó a alcanzar más de 7 metros (Poland et al., 1975) (Fig. 10).

Este problema de subsidencia en el Valle de San Joaquín representó en 1993 una pérdida en el valor de la propiedad de las zonas afectadas equivalente a \$180 millones de dólares al año debido a su inhabilitación o reemplazamiento de tuberías de riego y pozos (G. Bertoldi y S. Leake, comunicación personal; en Galloway y Riley, 1999).



Fig. 3.10. Localidad del Valle de San Joaquín al suroeste de Mendota, California, en donde se encuentra la mayor subsidencia reportada en Estados Unidos por el doctor Joseph F. Poland (en la fotografía). Las señales en el poste muestran la altitud aproximada que tenía la superficie del terreno en 1925, 1955 y 1977. Imagen tomada de Galloway y Riley (1999).

Los sistemas de acuíferos que incluyen capas de sedimentos finos no permeables son conocidos como **aquitardos**. Si el espesor de los sedimentos finos es suficiente, el decremento a largo plazo del nivel de agua puede promover una vasta liberación de **agua de consolidación** por la compactación de los aquitardos, que a su vez puede resultar en la subsidencia del terreno. La liberación del agua de consolidación está acompañada de una reducción considerable e irrecuperable del volumen de los poros de los aquitardos y, por lo tanto, de su capacidad para almacenar agua (Galloway et al., 2000a).

3.4.2. Desagüe de suelos orgánicos

De acuerdo con Stephens et al. (1984), los suelos ricos en contenido orgánico también pueden experimentar subsidencia cuando se les drena agua o cuando son usados para el desarrollo de turberas (que son el producto de la putrefacción de vegetación en agua ácida). Las turberas tienen una gran aplicación agrícola gracias a su capacidad para retener agua. Los mecanismos responsables de la subsidencia en estos casos son el aumento de densidad (a través de la pérdida de flotabilidad, contracción y compactación) o pérdida de masa (a través de la oxidación biológica, combustión, hidrólisis y lixiviación, erosión y extracción). El aumento de la densidad (densificación) usualmente ocurre poco tiempo después del desagüe, mientras que la pérdida de masa es un proceso lento y continuo. El desagüe de las turberas y su consecuente subsidencia pueden acarrear varias consecuencias. Por ejemplo, la pérdida de la profundidad de las raíces en donde el sustrato no es favorable para su crecimiento (ya sea rocoso, ácido o salino), la inestabilidad de carreteras y otras estructuras, el incremento en la extracción de nutrientes, superficies más frías durante las noches invernales, e incremento en el flujo de CO₂ hacia la atmósfera (Stephens et al., 1984).

3.4.3. Sumideros

Las subsidencias repentinas y catastróficas conocidas como **sumideros** (*sinkholes*) suelen ocurrir en aquellos sitios en donde el nivel del agua subterránea es reducido por extracción o en donde la percolación del agua subterránea disuelve y forma cavidades en dos tipos específicos de rocas: evaporitas (sal, yeso y anhidrita) y carbonatos (calizas y dolomitas) (Galloway et al., 2000a). La sal y el yeso son tan solubles que permiten la formación de cavidades en cuestión de días a años, mientras que en el caso de los carbonatos el mismo fenómeno ocurre en centenas a miles de años. Ejemplos claros de zonas afectadas por sumideros son el sur de Tamaulipas y el sureste de Tabasco, México (Gary, 2002; Geissen et al., 2008). Otro ejemplo es el distrito de Beacon Woods en Florida, Estados Unidos, en donde

de acuerdo con Veni et al. (2015) la ocurrencia de sumideros superficiales ocurre en un orden de magnitud mayor en las zonas urbanas con respecto a las áreas no desarrolladas. Esto sugiere que las propias estructuras urbanas promueven o intensifican el colapso. Estos mismos autores identifican que la causa más probable de los colapsos en este distrito sea un continuo incremento y decremento en el **nivel freático** (que es la profundidad en la que se encuentra el agua más superficial en el subsuelo), lo que ocasionaría un arrastre de los sedimentos de los suelos hacia cavidades más profundas presentes en carbonatos. Esa variación en el nivel freático podría generarse, según esos mismos autores, por la dispersión inadecuada de escorrentía (*runoff*) de agua que corre a través de caminos, estructuras y embalses; o por la fuga de agua, alcantarillado y sistemas sépticos por debajo o adyacente a una estructura.

La ciudad de Guatemala puede darnos una idea del riesgo que pueden representar los sumideros profundos en las zonas urbanas descritos por Hermosilla (2012), en donde residentes de las Zonas 6 y 2 de esta ciudad comenzaron a reportar vibraciones y sacudidas en sus casas desde 2005. Estos reportes no fueron tomados en cuenta por las autoridades hasta el 22 de febrero de 2007, cuando se generó un sumidero en la intersección entre dos calles de la Zona 6. Ese colapso de 30 m de diámetro y 60 m de profundidad afectó cinco casas, provocó la muerte de tres personas y obligó el desplazamiento otros 450 a refugios temporales. Investigaciones realizadas por varios institutos propusieron algunas soluciones para el colapso sin dar con la causa. Una de esas propuestas consistía del relleno inmediato del colapso. El congreso de Guatemala aprobó un presupuesto destinado a concretar esa propuesta y el trabajo fue realizado. Desafortunadamente ocurrió un segundo colapso en la Zona 2 el 29 de mayo de 2010 (Fig. 11), que provocó el derrumbe de un edificio de tres pisos y la desaparición de tres personas. Con este segundo colapso la información sobre la red de alcantarillado fue entregada por los profesionistas involucrados en su diseño a finales de los años 70. Con esta información fue evidente que el proyecto de la construcción de la red de alcantarillado nunca fue terminado de acuerdo con el diseño original, y que muchas alcantarillas fueron selladas con calles pavimentadas y/o rellenas por nuevos desarrollos urbanos. Esto ha obligado a analizar una red de alcantarillado anticuada y su impacto a la población para prevenir la generación de un nuevo sumidero.

3.4.4. Medidas preventivas

Los esfuerzos para mitigar los problemas de subsidencia son variados y han dependido de las distintas causas y formas en las que se puedan presentar. Esos esfuerzos incluyen la aplicación de programas de información pública, que al menos

debe estar dirigida a aquellos profesionistas que, en el curso de su trabajo, pueden confrontar directamente problemas asociados a subsidencia (ingenieros, geólogos, planeadores de uso de suelo, administradores, agentes de seguros, etc.).

De hecho, para algunos ésta es generalmente la primera actividad que debe realizarse en un área ya afectada por subsidencia, antes incluso que el aviso al público en general.

Sin embargo, si la subsidencia no cesa y su severidad aumenta, también lo hace la necesidad de involucrar a un público mayor. En el caso de la gestión de un problema de subsidencia mayor, es necesario el manejo de dos tipos de información.



Fig. 3.11. Sumidero profundo en la Zona 2 de la ciudad de Guatemala generado el 29 de mayo de 2010. Fotografía tomada al día siguiente por Paulo Raquec y exhibida en la página: <https://www.flickr.com/photos/gobiernodeguatemala/4656432029/in/set-72157624035870825/>

Por un lado, el público debe ser alertado del área específica que está siendo afectada y de la naturaleza del peligro; así los individuos podrán ser más conscientes de su propia exposición al mismo.

Por el otro lado, el público debe ser enterado de las causas del problema y de cuáles son las opciones disponibles para encararlo, debido a que un público informado suele apoyar más las medidas (algunas veces costosas) necesarias para gestionar el problema.

Los riesgos y los costos económicos asociados a subsidencia dependen de la proximidad de las áreas urbanas, de las estructuras presentes y de los cuerpos de

agua. Por esta razón, para la gestión de los problemas de subsidencia es importante aplicar desde el inicio programas de mapeo de peligro y riesgo.

Sin embargo, la aproximación más directa para la mitigación de problemas de subsidencia es la regulación de las actividades que la causan de acuerdo con la NCR (1991). Por ejemplo, en el caso de la extracción de algún recurso natural, la regulación puede incluir desde la restricción de la magnitud de extracción, hasta el control de cómo los materiales son removidos.

Las regulaciones para el uso de suelos en la presencia de una subsidencia real o potencial es una alternativa para su mitigación. Tales regulaciones involucran el planeamiento y el zonamiento del uso de suelos, códigos de construcción especializados, y mapas oficiales. Por ejemplo, Veni et al. (2015) proponen que las zonas de riesgo para la incidencia de sumideros que se encuentren dentro del distrito de Beacon Woods en Florida (Estados Unidos), sean consideradas como zonas prohibidas para la construcción. Esto o que requieran un diseño profesional registrado que demuestre que la construcción que se deseé desarrollar restrinja de manera medible: a) la descarga accidental de agua municipal a través de sistemas de drenaje en suelos subterráneos; b) la descarga deliberada de aguas pluviales de los edificios, carreteras, estacionamientos u otras cubiertas impermeables construidas; c) la recarga inducida de aguas subterráneas poco profundas de estanques de retención y fosas sépticas; d) el uso de tierras con gran irrigación como viveros de plantas, campos de golf y piscinas para uso deportivo o doméstico.

Lista de referencias

- ALCÁNTARA-AYALA, I., ALONSO-ECHEVARRÍA, L., GUTIEREZ-MATÍNEZ, C., DOMÍNGUEZ-MORALES, L., & NORIEGA-RIOJA, I., (2008). *Inestabilidad de laderas*, Serie Fascículos, Secretaría de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 39 pp.
- ALTEZ, R., & REVET, S. (2005). Contar los muertos para contar la muerte: discusión en torno al número de fallecidos en la tragedia de 1999 en el estado Vargas-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 46, 21-43.
- ANDRESEN, A., & BJERRUM, L., (1967). Slides in Subaqueous Slopes in Loose Sand and Silt. In Marine Geotechnique (Richards, A. F., ed.), *Univ. of Illinois Press, Urbana*, 221-239.
- BAXTER P.J., ING, R., FALK, H., PLIKAYTIS, B., (1983). Mount St. Helens eruptions: the acute respiratory effects of volcanic ash in a North American community. *Arch Environ Health*, 38:138-143.
- BLONG, R.J., (2000). *Volcanic hazards and risk management*. In: Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 1215–1240.
- BROAD, W.J. (1996). *El Popo's rumblings draw volcanologists to the edge of danger*. The New York Times, C1.
- CAMPBELL, R.H. (1975). *Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California (No. 851)*. US Govt. Print. Off.,
- CARLINO, S., SOMMA, R., & MAYBERRY, G. C. (2008). Volcanic risk perception of young people in the urban areas of Vesuvius: Comparisons with other volcanic areas and implications for emergency management. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172(3), 229-243.
- CENAPRED-UNAM, (1995). Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994–1995. CENAPRED-UNAM, México, D.F. 339. [*Una colección de 17 artículos reunidos por el Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM*].
- CUENALO-CAMPOS, O.A., OLIVA-GONZÁLEZ, A.O. & GALLARDO-AMAYA, R. (2011). Inestabilidad de laderas. Influencia de la actividad humana. *Elementos*, 84, 39-46.
- DE BOER, J.Z., SANDERS, D.T., (2002). *Volcanoes in Human History*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- DE LA CRUZ-REYNA, S., MELI, R.P., QUAAS, R.W., (2000). Volcanic crises management. In: Sigurdsson, H., Hughton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1199-1214.
- DE LA CRUZ-REYNA, S., & TILLING, R. I. (2008). Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatépetl Volcano, Mexico: importance

- of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1), 121-134.
- DOOCY, S., DANIELS, A., DOOLING, S., GOROKHOVICH, Y., (2013). The Human Impact of Volcanoes: a Historical Review of Events 1900-2009 and Systematic Literature Review. *PLoS currents*. Doi: 10.1371/currents.dis.841859091a706efebf8a30f4ed7a1901.
- ESPÍNDOLA, J.M. & MACÍAS, J.L. (1996). El vulcanismo. *Ciencias*, 41, 12-22. [En línea].
- EVANS, S. G., & BENT, A. L. (2004). The Las Colinas landslide, Santa Tecla: A highly destructive flowslide triggered by the January 13, 2001, El Salvador earthquake. *Geological Society of America Special Papers*, 375, 25-38.
- FAVALLI, M., CHIRICO, G.D., PAPALE, P., PARESCHI, M.T., BOSCHI, E., (2009). Lava flow hazard at Nyiragongo volcano, DRC. *Bulletin of Volcanology*, 71(4), 363-374.
- FORBES L, JARVIS D, POTTS J, BAXTER PJ (2003) Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, British West Indies. *Occup Environ Med* 60:207-211.
- FRANCIS, OPPENHEIMER, C., (2004). *Volcanoes*, Oxford University Press, 521 p.
- Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States (Vol. 1182). United States Department of the Interior, United States Geological Survey.
- GALLOWAY, D. L., JONES, D. R., & INGEBRITSEN, S. E. (2000). Land subsidence in the United States: US Geological Survey Fact Sheet-165-00, 4 pp.
- GALLOWAY, D., & RILEY, F. S. (1999). San Joaquin Valley, California. Land subsidence in the United States: US Geological Survey Circular, 1182, 23-34.
- GARY, M. (2002). Understanding Zacatón: Exploration and initial interpretation of the world's deepest known phreatic sinkhole and related karst features, southern Tamaulipas, Mexico. *Karst Frontiers*, Karst Waters Institute Special Publication, 7, 141-145.
- GEISSEN, V., LÓPEZ DE LLERGO-JUÁREZ, J. G., GALINDO-ALCÁNTARA, A., & RAMOS-REYES, R. (2008). Erosión superficial y carstificación en Macuspana, Tabasco, sureste de México. *Agrociencia*, 42(6), 605-614.
- GUFFANTI, M., MAYBERRY, G. C., CASADEVALL, T. J., & WUNDERMAN, R. (2009). Volcanic hazards to airports. *Natural hazards*, 51(2), 287-302.
- HERMOSILLA, R. G. (2012). The Guatemala City sinkhole collapses. *Carbonates and evaporites*, 27(2), 103-107.
- HIGHLAND, L., & JOHNSON, M., 2004. *Landslide Types and Processes*, Fact Sheet 2004-3072, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 4 pp.

- HOLLOWAY, M., (2000), the Killing Lakes: *Scientific American*, v. 283, p. 92-99.
- HORWELL, C. J., & BAXTER, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, 69(1), 1-24.
- HUNGR, O., EVANS, S.G., BOVIS, M.J., AND HUTCHINSON, J.N., (2001), a review of the classification of landslides of the flow type: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, p. 221–238.
- HUTCHINSON, J.N., (1992), Flow slides from natural slopes and waste tips: *Proceedings, III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, La Coruña*, v. 3, p. 827-841.
- JOHNSTON, D., RONAN, K., (2000). Risk education and intervention. In: Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 1229-1240
- KENEDI, C.A., BRANTLEY, S.R., HENDLEY II, J.W., & STAUFFER, P.H., (2000). Volcanic Ash Fall-a “Hard Rain” of Abrasive Particles, Fact Sheet 027-00, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2 pp.
- KOPPEJAN, A.W., VAN WAMELON, B.M., WEINBER, L.J.H., (1948). Coastal Flow Slides in the Dutch Province of Zeeland. *Proceeding 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Rotterdam*, v. 5, p. 89-96.
- KOTLYAKOV, V., & KOMAROVA, A. (2006). *Elsevier’s dictionary of geography: in English, Russian, French, Spanish and German*. Elsevier, North Holland, 1072 pp.
- LARSEN, M. C., WIECZOREK, G. F., EATON, L. S., MORGAN, B. A., & TORRES-SIERRA, H. (2001). Venezuelan debris flow and flash flood disaster of 1999 studied. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(47), 572-573.
- LINDELL, M.K., (1994). Perceived characteristics of environmental hazards. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters* 12 (3), 303–326.
- MARSAL, R.J. Y MENDOZA, M.J. (1985). Cambios en las propiedades geotécnicas de algunos suelos trópicos residuales debido al tratamiento previo a su ensaye, *Publicación No. 48, CFE, México*.
- MENDOZA, M. J., NORIEGA, I., & DOMÍNGUEZ, L. (2000). Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Pue., provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999. *SEGOB, CENAPRED*.
- MCGEE, L. E., SMITH, I. E., MILLET, M. A., HANDLEY, H. K., & LINDSAY, J. M. (2013). Asthenospheric control of melting processes in a monogenetic basaltic system: A case study of the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Petrology*, 54 (10), 2125-2153.

- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NCR) (1991), *Mitigating losses from land subsidence in the United States*: Washington, D. C., National Academy Press, 58 p.
- PROYECTO: METODOLOGÍAS PARA EL ANALISIS Y MANEJO DE LOS RIESGOS NATURALES (MET-ALARN) (2005). *Inestabilidad de laderas. Mapas de Amenazas. Recomendaciones técnicas para su elaboración*, Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Managua, Nicaragua. 88 pp.
- PATON, D., JOHNSTON, D.M., BEBBINGTON, M.S., LAI, C.D., HOUGHTON, B.F., (2001). Direct and vicarious experience of volcanic hazards: implications for risk perception and adjustment adoption. *Australian Journal of Emergency Management* 15 (4), 58-63.
- POLAND, J. F., LOFGREN, B. E., IRELAND, R. L., & PUGH, R. G. (1975). *Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1972*, Geological Survey Professional Paper 437-H, United States Geological Survey, California Department of Water Resources, 87 pp.
- PROST, G.L., (1998). *English-Spanish and Spanish-English Glossary of Geoscience Terms*, CRC Press, Taylor & Francis, 376 pp.
- RITTMAN, A., (1962). *Volcanoes and their activity*, Interscience Publications, New York (trans. E.A. Vincent).
- ROBOCK, A., (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics* 38(2):191–219.
- SALCEDO, D.A., (2000). Los flujos torrenciales catastróficos de Diciembre de 1999, en el estado Vargas y en Caracas: Características y lecciones aprendidas, *Memorias XVI Seminario Venezolano de Geotecnia*, pp. 128-175, Caracas, 2000.
- SCHWEIER, C., & MARKUS, M. (2006). Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment. *Bulletin of earthquake engineering*, 4(2), 177-192.
- SIEBE, C., ABRAMS, M., MACÍAS, J.L., (1995a). Derrumbes gigantes, depositos de avalancha de escombros y edad del actual cono del Volcán Popocatepetl. *Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994–1995*. CENAPRED-UNAM, México, D.F., pp. 195–220.
- SIEBE, C., ABRAMS, M., MACÍAS, J. L., OBENHOLZNER, J., (1996a). Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future? *Geology*, 24(5), 399-402.
- SIEBE, C., MACÍAS, J.L., ABRAMS, M., OBENHOLZNER, J., (1996b). La destrucción de Cacaxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatepetl, *Ciencias*. 41, 36-45.

- SIRBESCU, M-L.C., AND NABELEK, P.I., (2003), Crustal melts below 400°C, *Geology*, v. 31, p. 685-688.
- SLOVIC, P., (1987). Perception of risk. *Science* 236, 280–285.
- SMALL, C., & NAUMANN, T. (2001). The global distribution of human population and recent volcanism. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 3(3), 93-109.
- SMITH, A. H. V., & EVANS, I. (1949). Sensitivity of Clays to Remoulding. *Nature*, 164, 319-319.
- SPERA, F.J., (2000), Physical properties of magmas. En: Sigurdson, H., editor, *Encyclopedia of Volcanoes*, New York, Academic Press, p. 171-190.
- STEPHENS, J. C., ALLEN, L. H., & CHEN, E. (1984). Organic soil subsidence. *Reviews in Engineering Geology*, 6, 107-122.
- TILLING, R. I. (2009). El Chichón's "surprise" eruption in 1982: Lessons for reducing volcano risk. *Geofísica internacional*, 48(1), 3-19.
- TILLING, R.I., LIPMAN, P.W., (1993). Lessons in reducing volcano risk. *Nature* 364, 277–280.
- UNDRU-UNESCO, (1985). *Volcanic Emergency Management*. United Nations, New York.
- VARNES, D.J., (1978). Slope Movement Types and Processes, in *Landslides: Analysis and Control*, Schuster, R.L., & Krizek, R.J. (Ed.). National Academy of Sciences, National Research Council, Transportation Research Board, Special Report, 176, 11-33.
- VENI, G., CAMPBELL BRASHEAR, C., & GLASBRENNER, A. (2015). Building Codes to Minimize Cover Collapses in Sinkhole-Prone Areas, 14th Sinkhole Conference, and NCKRI Symposium 5, p. 471-476.
- VOIGHT, B., (1990). The 1985 Nevado Del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 44, 349–386.
- VON BLANCKENBURG, F. (2005). The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3), 462-479.
- WILLIAMS, R.S., JR., MOORE, J.G., (1983). *Man Against Volcano: The eruption of Heimaey, Vestmannaeyjar, Iceland*, USGS publication, 31 p.
- WITHAM, C.S., OPPENHEIMER, C., (2004). Mortality in England during the 1783-4 Laki craters eruption. *Bulletin of Volcanology* 67 (1), 15-26.

CAPÍTULO 4

Riesgo sísmico y fenómenos asociados en áreas urbanas



Riesgo sísmico y fenómenos asociados en áreas urbanas

Gina Villalobos Escobar

4.1 Introducción

En muchos lugares del mundo, el proceso de urbanización se está acelerando vertiginosamente debido a las nuevas políticas económicas, sociales y territoriales. La logística del crecimiento urbano es cada vez más compleja y su alcance sigue abriendo nuevos retos y demandas (Cohen Barney, 2004). La fuente fundamental de confusión en el estudio de los procesos de urbanización y crecimiento urbano, radica en la cuantificación misma del término “urbano”, ya que su definición sigue siendo transitoria y cambiante en tiempo y espacio (Frey & Zimmer, 2001).

La medición del impacto que un sismo puede tener sobre un ambiente urbano requiere la estimación de muchas variables. Algunas de estas variables contemplan exclusivamente el fenómeno sísmico en términos de sus características físicas y geomorfológicas como: magnitudes, cercanía, periodos de recurrencia, propiedades del suelo.

Otras variables, más complejas de cuantificar, involucran el efecto que dicho evento sísmico tendría en una región urbanizada en particular. Algunas de estas variables son: evaluación de la vulnerabilidad del entorno, densidad de población, calidad de materiales de construcción, tipología estructural, edad de las edificaciones, entre otros (Restrepo et al., 2007). En este capítulo, se hará un recuento somero del fenómeno sísmico desde el punto de vista físico y geológico, y su influencia y potencial destructivo en los asentamientos urbanos crecientes.

4.2 Conceptos generales

Existe mucha desinformación alrededor del tema de los sismos. Las leyendas urbanas y las creencias populares trascienden generaciones hasta el punto en el que nadie las cuestiona.

Los prejuicios o creencias anquilosadas en las culturas dificultan mucho el proceso de educación y capacitación en estos temas. Vamos a exponer los conceptos principales alrededor del fenómeno sísmico para poder desarrollar posteriormente otros aspectos a discutir.

4.2.1. ¿Qué es un sismo o terremoto?

Es el repentino movimiento de la tierra debido al rompimiento y desplazamiento de una falla sísmica. El movimiento de la tierra resulta de la radiación de la energía sísmica liberada por dicho rompimiento. También pueden ser producto de energía liberada por alguna actividad volcánica o por súbitos cambios en los esfuerzos presentes en el interior de la Tierra. (USGS, 2017).

4.2.2. ¿Por qué ocurren los sismos?

Las placas tectónicas son placas gigantescas que conforman la capa externa de la Tierra sólida, conocida en el ambiente geológico como corteza terrestre o simplemente corteza (figura 4.1). Pueden ser de tipo oceánico, si están completamente cubiertas por agua oceánica, o de tipo continental. Las placas tectónicas están en constante movimiento y, por lo tanto, chocan e interactúan entre sí. Su interacción puede formar tres tipos de bordes o fronteras (figura 4.2).

- a) Fronteras convergentes. Cuando se presenta incidencia o choque entre diferentes placas. Por ejemplo, la placa de Cocos incide por debajo de la placa de Norteamérica en de la costa pacífica del suroccidente de México.
- b) Fronteras divergentes. Cuando las placas se separan unas de otras. Esto ocurre en la dorsal localizada en la mitad del océano Atlántico.
- c) Zonas transcurrentes o transformantes. Las placas se desplazan lateralmente en direcciones opuestas creando un efecto de cizalla en la frontera. Este fenómeno ocurre a lo largo de la parte norte de Turquía o en la conocida Falla de San Andrés en Baja California (México) y California (EEUU).

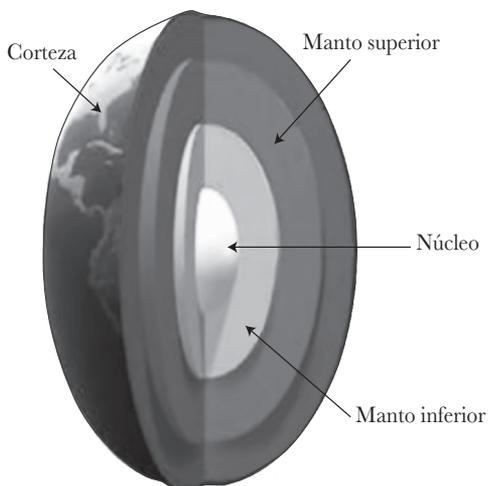
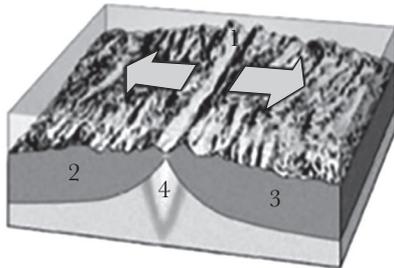


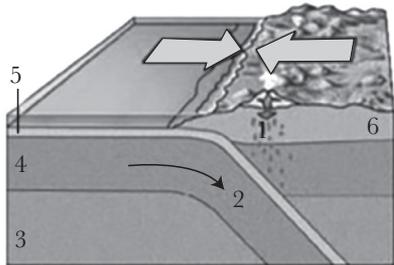
Figura 4.1. Esquema de las diferentes capas de la Tierra. Imagen recuperada de: <https://es.pinterest.com/pin/365284219756254670/>

A medida que las placas se mueven unas con respecto a otras, la fuerza de fricción que se acumula entre ellas se almacena en forma de energía que se acumula lentamente por periodos largos de tiempo (meses, años, décadas o incluso siglos). Cuando los límites elásticos de las rocas se ven excedidos, las fronteras entre las placas se rompen súbitamente, dando lugar a la liberación de la energía acumulada (energía sísmica) en forma de ondas que viajan por el interior de la Tierra y recorren largas distancias. A este modelo de acumulación de energía y ruptura se le conoce como “Teoría del Rebote Elástico” (figura 4.3), y fue propuesta por Henry Fielding Reid en 1910 (Grotzinger et al., 2007).

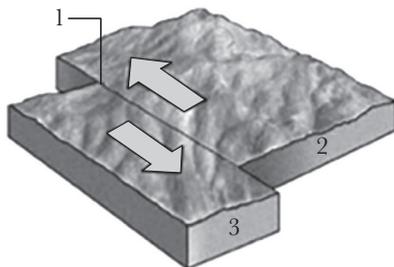
Las interacciones entre las placas se producen en sus bordes



En los **bordes divergentes** las placas se separan, por lo que asciende material del manto y se crea nuevo suelo oceánico



En los **bordes convergentes** las placas se aproximan y se produce la subducción (consumo) de la litosfera oceánica en el manto



En los **bordes de falla transformante** las placas se deslizan una respecto a la otra y ni se produce ni se destruye litosfera

Figura 4.2. Tipos de fronteras entre placas tectónicas.

Imagen recuperada de: <https://www.pinterest.com/SaraAranda0339/geograf%C3%ADa/>

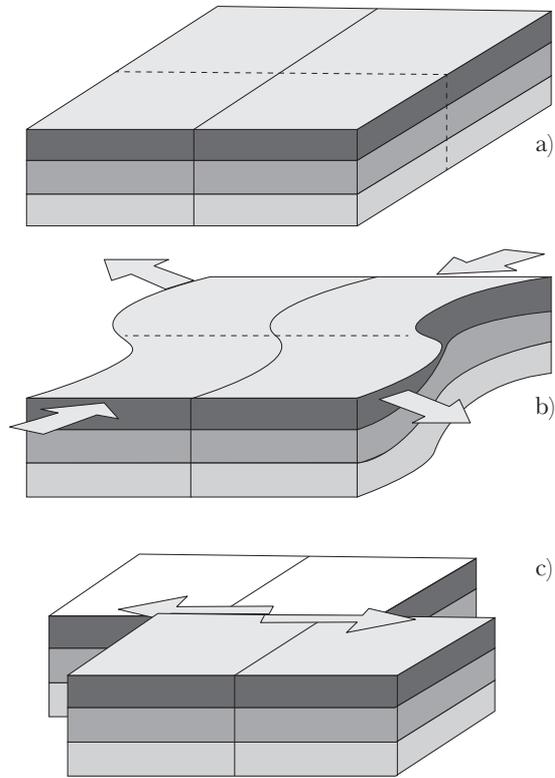


Figura 4.3. Tres etapas de la Teoría del Rebote Elástico propuesta por Reid en 1910 (Grotzinger et al., 2007). a) Frontera en estado de reposo. b) Los esfuerzos tectónicos se acumulan gradualmente y generan deformaciones elásticas progresivas. c) Cuando los esfuerzos acumulados exceden la resistencia de las rocas a lo largo de la falla, ésta se rompe súbitamente, generando un desplazamiento relativo entre ambas fronteras de la falla y liberando gran cantidad de energía. Imagen recuperada de: http://www.sernageomin.cl/Museo_Geologico/terremotos/losTerremotos.html

4.2.3. ¿Cuáles son las partes principales de un sismo?

- Hipocentro o foco: es la zona en el interior de la Tierra donde inicia la ruptura de la falla. Desde ahí se propagan las ondas sísmicas. (Tarbuck y Lutgens, 2001). Ver figura 4.4
- Epicentro: es el punto en la superficie terrestre situado directamente encima del hipocentro. Es la proyección del hipocentro en la superficie. (Tarbuck y Lutgens, 2001). Ver Figura 4.4
- Falla: Superficie a lo largo de la cual se acumula la energía sísmica y se produce finalmente la ruptura que da origen al sismo.

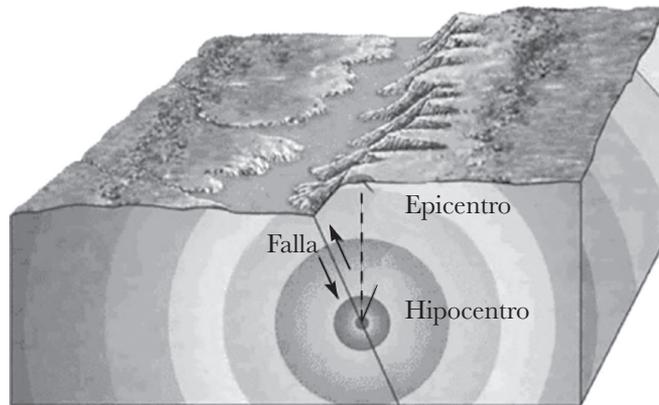


Figura 4.4. Partes de un sismo. Imagen recuperada de:
<http://sismos-janeth.blogspot.mx/2012/04/sismos-o-seismos.html>

4.2.4. ¿Cómo se registran los sismos?

Los terremotos son registrados por instrumentos especializados llamados sismógrafos. Los primeros sismógrafos funcionaban basados en un principio muy sencillo. Poseían una base (marco) sujeta firmemente al suelo y una masa muy pesada que colgaba libremente de esta base. Cuando el sismo llegaba y causaba un movimiento del suelo, la base del sismógrafo se movía en simultánea con el suelo, pero la masa tendía a permanecer estática por un lapso breve de tiempo debido a su gran inercia.

La diferencia en las posiciones relativas entre la base y la masa era lo que finalmente se medía (USGS, 2017) y se graficaba en rollos de papel. Actualmente existen equipos sumamente sofisticados que usan campos magnéticos para medir las inercias en las masas internas del instrumento con gran precisión, y registran digitalmente los datos en lapsos muy cortos de tiempo (200 o 400 muestras por segundo).

4.2.5. ¿Cómo se localizan los sismos?

Una vez se registra el evento sísmico, se pueden identificar varios tipos de ondas. Existen 2 tipos de ondas sísmicas: las ondas de cuerpo y las ondas superficiales. Las ondas de cuerpo viajan a través del interior de la Tierra y son a su vez de 2 tipos.

Ondas P: Son ondas compresionales. El material que es atravesado por estas ondas se comprime y dilata en la misma dirección en la que viaja la onda.

Ondas S: Son ondas de corte (o de cizalla). El material se mueve perpendicularmente a la dirección en la que se mueve la onda. Ver figura 4.5

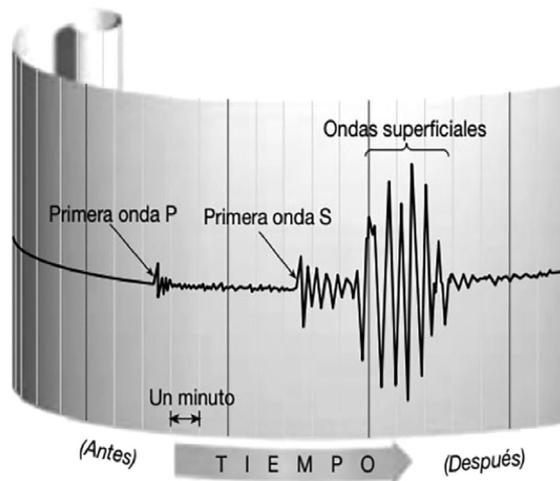


Figura 4.5. Ejemplo de un sismograma y de los tipos de ondas que se registran en su orden de llegada. Imagen recuperada de: http://rsn.ucr.ac.cr/index.php/faq/sismologia/2326-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-momento-y-magnitud-richter_

Las ondas P viajan más rápidamente que las ondas S, por lo que se registran primero en los sismogramas. El primer pulso que se registra es siempre una onda P, seguido, algunos segundos después por una onda S. Después llegan las ondas superficiales, que viajan sólo en la superficie de la Tierra. (Stein y Wisession, 2003).

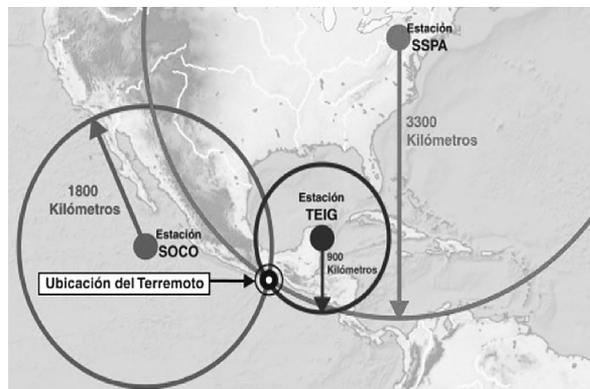


Figura 4.6. Localización de un epicentro por triangulación. <https://litosferaymovimiento.wordpress.com/2013/04/25/como-se-localizan-los-terremotos/>

Actualmente, este proceso es ejecutado iterativamente por una computadora, hasta que los datos de una gran cantidad de registros sismográficos del mismo evento coincidan en la localización de su epicentro, de su hipocentro y en la hora en la que comenzó el sismo (Stein y Wisession, 2003).

Para localizar un epicentro, se deben identificar los arribos de las ondas P y S. El intervalo de tiempo entre estos arribos depende directamente de la distancia que las ondas han viajado desde su origen (foco). Mientras más amplio sea este intervalo de tiempo, más lejos se encuentra el foco del sismo. La relación entre estos intervalos de tiempo y las distancias recorridas se ha establecido midiendo ondas sísmicas de terremotos o de explosiones nucleares de las que se conoce su origen y, por tanto, su distancia al sismógrafo. Ahora bien, si se tienen registros de 3 o más estaciones, se puede hacer una triangulación gráfica y encontrar el epicentro. Si se traza una circunferencia en un mapa, alrededor de las estaciones de registro, con las distancias calculadas como radio, la intersección de las circunferencias nos indicará la localización del epicentro. Ver figura 4.6

4.2.6.1 ¿Cómo se mide el tamaño de un sismo?

El tamaño de un sismo es un concepto que puede ser absoluto o relativo. La energía liberada en su ruptura es finita y constante, por lo que puede ser medida y cuantificada. La percepción del sismo por parte de los asentamientos humanos y su potencial destructivo son relativos porque dependen de varios factores. Si una comunidad está más cerca del epicentro que otra, es muy probable que ambas sientan los efectos del mismo sismo de manera diferente. Así mismo, los daños presentados en ambas poblaciones también serán distintos, ya que dependen del tipo de construcción predominante y su calidad. Si un sismo afecta una ciudad, cuyas edificaciones fueron diseñadas y construidas bajo ciertas regulaciones sísmo resistentes, es menos probable que se vea afectada hasta el colapso en comparación con una ciudad cuya infraestructura no tenga ninguna regulación en diseño y construcción.

4.2.6.1. Magnitud de un sismo

La magnitud de un temblor está relacionada con la energía liberada en forma de ondas sísmicas que se propagan a través del interior de la Tierra. Para calcular esta energía, cuantificarla y determinar la magnitud de un temblor se realizan cálculos matemáticos basados en los registros obtenidos por los sismógrafos de diferentes estaciones. En estos registros o sismogramas se miden algunas características de las ondas (como su amplitud) y la distancia a la que se encuentra la estación del epicentro. Estos valores son introducidos en una ecuación matemática calibrada, obteniendo así la magnitud.

Existen diferentes magnitudes (así como existen diferentes tipos de medidas de peso o de longitud), es decir, existen diversas fórmulas matemáticas y técnicas para calcular diferentes magnitudes. Originalmente, Charles Francis Richter (1900-

1985), estableció una manera de medir el tamaño de los sismos en California (Estados Unidos), y la escala de Richter estableció durante muchas décadas la manera en la que se cuantificaban dichos eventos. Actualmente, la escala de Richter original está en desuso. Las magnitudes que se usan ahora son: la magnitud local M_l (derivada de la escala de Richter), la magnitud de coda M_c , la magnitud de energía M_e , la magnitud de momento sísmico M_w , entre otras. Cada una de estas formas de calcular la magnitud tiene sus ventajas y sus limitaciones. Algunas son más rápidas de calcular pero menos precisas, otras son más precisas pero su cálculo necesita más tiempo; unas son más confiables para sismos pequeños, otras para sismos grandes. (SSN, Servicio Sismológico Nacional, 2017)

4.2.6.2. Intensidad de un sismo

La intensidad es una forma de medir los efectos causados por un sismo en un lugar determinado de la superficie terrestre. En ese lugar, un sismo pequeño pero muy cercano puede causar alarma y grandes daños, en cuyo caso decimos que su intensidad es grande. En cambio, si otro sitio está lo suficientemente alejado de un sismo muy grande, es posible que su población apenas pueda sentirlo. En este caso, la intensidad del sismo en ese lugar, será pequeña. La escala más común en América para medir intensidad es la escala modificada de Mercalli (mm) que data de 1931. Ésta, abarca desde el grado I (detectado sólo con instrumentos) hasta el grado XII (destrucción total). Los daños leves corresponderían a un grado V o menor. Como la intensidad varía de punto a punto, las evaluaciones en un lugar dado constituyen, generalmente, un promedio; por eso se acostumbra hablar solamente de grados enteros (Nava, 2011). Ver figura 4.7

Intensidad	Descripción
I	Detectada por instrumentos muy sensibles
II	Sentido únicamente por personas en estado de reposo
III	Sentido en el interior de edificaciones mediante vibraciones similares al paso de un camión
IV	Movimiento de platos, ventanas, lámparas
V	Ruptura de platos, ventanas y otros
VI	Caída de acabados, chimeneas, daños estructurales menores
VII	Daños considerables en edificios mal construidos
VIII	Caída de paredes, momumentos, chimeneas
IX	Movimiento de fundaciones en edificios de mampostería, grandes grietas en el suelo,

Intensidad	Descripción
	rotura de tuberías
X	Destrucción de la mayoría de la mampostería, grandes grietas en el suelo, doblamiento de rieles de ferrocarril, derrumbes y deslizamientos
XI	Sólo permanecen muy pocas construcciones, ruptura de puentes
XII	Daño total, presencia de ondas en la superficie, distorsión de líneas de nivel, objetos arrojados al aire

Figura 4.7. Escala de Intensidades Modificada de Mercalli

4.2.7. ¿Qué es la sismología?

Es el estudio de la generación, propagación y registro de las ondas elásticas en la Tierra (y otros cuerpos celestes) y las fuentes que las producen. (Lay y Wallace, 1995).

4.3 Ejemplos de sismos importantes

Sólo en el último siglo, los terremotos alrededor del globo han causado más de 13 000 muertes por año y miles de millones de dólares en pérdidas económicas.

A continuación se mostrarán ejemplos de sismos enormemente destructivos y sus características propias, dadas sus condiciones geológicas y antropogénicas.

4.3.1. Sismos de Michoacán, 1985

(Conocidos como sismos de Ciudad de México de 1985)

El 19 y 21 de Septiembre de 1985, ocurrieron 2 sismos muy importantes ($M_s=8.1$ y 7.5) en un segmento de la costa pacífica mexicana. El evento principal constó de 2 subeventos, separados 26 segundos entre sí. Lo que más llama la atención de estos eventos es que su mayor impacto no ocurrió cerca de la zona de origen, sino en la Ciudad de México, localizada a más de 360 km del epicentro. Este evento ocasionó más de 10 000 muertos, 50 000 damnificados y más de 4 000 millones de dólares en pérdidas materiales. Otro aspecto importante es que la ciudad estaba construida bajo un estándar sísmo resistente avanzado y reglamentado, lo que disparó una gran cantidad de estudios científicos sobre las condiciones reales y la pertinencia de las normas de diseño y construcción vigentes. Después de años de estudios, se concluyó que el desastre ocurrió por una gran amplificación local de las ondas sísmicas. Esta amplificación se generó porque la Ciudad de México está en su mayoría asentada encima de una capa arcillosa y suave sobre un lecho rocoso y firme. La amplitud que traían las ondas sísmicas fue amplificada hasta 50 veces en algunas zonas de la ciudad (Chávez-García y Bard, 1994).

Otro fenómeno presente en este evento fue el de resonancia mecánica. Cada estructura civil tiene una frecuencia preferencial de oscilación (frecuencia fundamental de la estructura). Si la frecuencia que transmite el sismo en el suelo sobre el que está asentada dicha estructura coincide con la frecuencia fundamental de la edificación, se producirá este fenómeno, incrementando la amplitud de las oscilaciones y causando bamboleos catastróficos que muchas veces culminan en colapso total. Ver figura 4.8



Figura 4.8. Destrucción masiva durante los sismos del 19 y 21 de septiembre de 1985 en Ciudad de México. Imagen recuperada de: <https://www.theguardian.com/cities/2015/sep/18/mexico-city-earthquake-30-years-lessons>

4.3.2. Sismo de Haití, 2010

El 12 de enero de 2010, un sismo de magnitud $M_w=7.1$ ocurrió a 15 km de distancia epicentral de Puerto Príncipe, capital de Haití. La cantidad de muertos superó los 230 000. Este sismo fue el doble de letal que cualquier otro terremoto previo de magnitud similar y el cuarto peor desde 1900. La razón del desastre yacía claramente en las ruinas. Las edificaciones estaban condenadas desde el momento en que fueron construidas. Acero de refuerzo frágil, agregados pétreos grandes y no angulosos, cementos de pobre calidad mezclados con arena sucia o salada, inadecuado e insuficiente refuerzo de acero en los elementos estructurales, en los nudos y en los elementos que iban a estar sometidos a los mayores esfuerzos, etc. Más del 15% de la población de Puerto Príncipe (2.5 millones) sufrió lesiones o murió, otro millón y medio quedó en completo desalojo. Esta catástrofe fue

consecuencia de muchas décadas de construcciones informales, azarasas, que carecían de supervisión técnica, permitidas por un gobierno inconsciente de su vulnerabilidad tectónica y laxa en sus leyes constructivas. Ver figura 4.9



Figura 4.9. Daños constructivos durante el sismo de Haití, en 2010. Imagen Recuperada de: <https://ngdc.noaa.gov/hazardimages/picture/show/1428>

4.3.3. Sismo de Chile, 2010

El 27 de febrero de 2010, un sismo de magnitud $M_w=8.8$ azotó la costa de Maule, en Chile. El terremoto fue consecuencia de una megafalla producto de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental Suramericana. A la fecha, este evento es el quinto mayor desde que se comenzaron a registrar los eventos, y el mayor en la región después del megasismo de 1960 ($M=9.5$) (Leyton et al., 2010). Dada la localización submarina del epicentro y su proximidad con la costa, el terremoto produjo un tsunami que afectó las costas del valle central entre las regiones del libertador Bernardo O'Higgins hasta la del Bío-Bío. En Constitución (ciudad costera de la región del Maule), media hora después del terremoto, tres olas de 8, 10 y 8 metros de altura, respectivamente, devastaron la ciudad. En localidades cercanas como Pichilemu, Pelluhue, Curanipe, Iloca y Coi, el mar penetró hasta 200 metros en tierra. En el puerto de Talcahuano (región del Bío-Bío), olas de hasta 5 metros de altura destruyeron prácticamente toda la zona pesquera, uno de los principales sustentos de la ciudad (Leiva y Quintana, 2010).

Las víctimas fatales superaron las 500 personas, unas 500 000 viviendas resultaron severamente dañadas y un aproximado de 2 millones de personas fueron damnificadas (Leiva y Quintana, 2010). Se presentaron daños no estructurales en prácticamente todo tipo de edificaciones, mientras que pocas construcciones comerciales, residenciales, empresariales o industriales sufrieron daños estructurales. El funcionamiento regular de muchos establecimientos se vio interrumpido, incurriendo en grandes pérdidas económicas, pero debidas mayormente a daños no estructurales (Miranda et al., 2012). El comportamiento estructural de las edificaciones civiles diseñadas bajo parámetros ingenieriles fue razonable (Elnashai et al., 2010).

Un megaterremoto de esta magnitud, pudo haber sido protagonista de un desastre sin precedentes en la historia mundial, sin embargo, el desempeño estructural de sus edificaciones, el comportamiento de sus autoridades y el rigor gubernamental en cuanto a control, leyes sismo resistentes y atención de desastres, evitaron que las consecuencias económicas y las pérdidas en vidas humanas fueran mucho peores. Ver figura 4.10



Figura 4.10. Edificaciones chilenas que sufrieron daños graves durante el terremoto, pero no incurrieron en colapso estructural.

4.4. Discusión sobre los sismos históricos

Estudiando los anteriores tres casos de sismos históricos importantes, podemos identificar varios aspectos a considerar.

No siempre el sismo más energético (de mayor magnitud) es el que produce más daños materiales o el que cobra más vidas.

En el caso de los sismos de Chile y Haití, podemos apreciar que la diferencia en muertes, destrucción y número de damnificados no fue debida al sismo, sino a las prácticas constructivas y a la preparación del estado en tema de contingencia de desastres. Mientras en Chile siguen una normativa estricta y moderna de diseño y construcción de infraestructura civil, en Haití existe una ausencia gubernamental en cuanto a regulaciones constructivas, que terminó cobrando la vida de cientos de miles de personas. Adicionalmente, las autoridades chilenas tienen contemplada y prevista la logística de acción y evacuación, mientras que las haitianas fueron tomadas por sorpresa, lo que ocasionó caos y más damnificados.

4.4.2. No siempre las poblaciones más cercanas al epicentro sufren los mayores daños

Aunque es usual que las mayores intensidades se sufran en las regiones cercanas a los epicentros, éste no siempre es el caso. En el sismo que devastó a la Ciudad de México en 1985, las ondas sísmicas viajaron cientos de kilómetros antes de verse amplificadas por los suelos presentes en la ciudad. Este efecto de amplificación local se conoce como “efecto de sitio” y está directamente relacionado con el tipo de suelo superficial (los primeros 30 metros) sobre el que están asentadas las estructuras civiles. Así mismo, muchas edificaciones de la ciudad sufrieron el efecto de resonancia mecánica. Para prevenir estos efectos de sitio se deben hacer estudios locales de microzonación y caracterización de suelos, con el fin de identificar aquellos potencialmente amplificadores y tomar las medidas geotécnicas necesarias para su control.

4.4.3. Las construcciones civiles más vulnerables ante terremotos son las edificaciones informales

Es muy común en ciudades en crecimiento, que parte de la población construya sus viviendas o lugares de trabajo de manera autodidacta o informal, ignorando las recomendaciones técnicas en diseño y construcción sismo resistente. Es fundamental estudiar la sismicidad local y regional de todas las áreas urbanas, incluso en regiones donde la sismicidad es baja, ya que puede existir una historia sísmica desconocida u olvidada por la población, que puede repetirse. Así mismo, es fundamental que las autoridades regulen los protocolos constructivos informales y que las entidades de protección civil tengan un protocolo establecido para el caso de una emergencia debida a terremoto.

4.5. Riesgo y peligro sísmico

La medición del impacto de un terremoto sobre un ambiente urbano requiere la estimación de la amenaza sísmica y de la vulnerabilidad del entorno, medida

en términos de variables como densidad de población, calidad de materiales y construcción, tipología estructural, edad de la edificación, etc. (Restrepo et al., 2007). Para poder calcular la posible afectación que un evento sísmico pueda producir en un determinado lugar, es necesario conocer la diferencia entre peligro y riesgo sísmico (Grotzinger et al., 2007).

4.5.1. ¿Qué es peligro sísmico?

El peligro sísmico o amenaza sísmica es la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo, en un sitio dado (Cardona, 1993). El peligro depende de la proximidad del sitio a fallas activas que puedan generar sismos y es expresado comúnmente de manera gráfica en forma de mapas de peligro sísmico (Stein y Wysession, 2003).

4.5.2. ¿Qué es el riesgo sísmico?

El riesgo sísmico describe el *daño esperado* en el largo plazo para una región específica (un estado, o incluso un país). Por lo tanto, el riesgo sísmico depende del peligro sísmico, pero también depende de qué tan expuesta esté dicha región tomando en consideración otras variables antropogénicas (Grotzinger et al., 2007) como: uso del suelo, número de habitantes, cantidad de edificaciones, calidad de la infraestructura, sistemas estructurales predominantes, edad de las construcciones, nivel socioeconómico, etc. **Riesgo específico:** grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento sísmico particular; **Elementos bajo riesgo:** la población, las edificaciones y las obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuestas en un área determinada; **Riesgo total:** número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un evento sísmico desastroso, es decir el producto del riesgo específico y los elementos bajo riesgo (Cardona, 1993).

4.5.3. Discusión sobre peligro y riesgo sísmico

Las diferencias entre peligro y riesgo sísmico se pueden explicar claramente si exponemos una situación hipotética en la que dos sismos de magnitud similar, periodo de retorno de ruptura similar y a una distancia semejante, afecten dos regiones diferentes. En primera instancia, se presenta una región mayormente rural, cuya población es escasa y cuya infraestructura es informal y principalmente habitacional. En segunda instancia, se presenta una región asentada por una gran ciudad, densamente poblada, cuya infraestructura civil es extensa y variada. Ante estos dos escenarios, podemos concluir que aunque ambas regiones presentan

un peligro sísmico muy similar, que depende únicamente de las características específicas del fenómeno sísmico (magnitud, localización, tipo de falla, etc.), el riesgo sísmico es mucho mayor en la gran ciudad que en el asentamiento rural, debido a la cantidad de personas y edificaciones que son vulnerables y a las consecuencias económicas esperadas.

4.6. Fenómenos asociados a sismos que afectan áreas urbanas

4.6.1. Tsunamis

Cuando un gran terremoto (erupción volcánica o un deslizamiento de tierra) ocurre bajo el océano, puede generar una ola destructiva conocida como *tsunami* (nombre en japonés para ola de puerto) (Stein y Wysession, 2003). Los tsunamis son los riesgos más mortíferos y destructivos que se pueden asociar a un gran terremoto. Los más comunes están relacionados con mega fallas sísmicas en zonas de subducción, que al romper desplazan el suelo oceánico hacia arriba y pueden deformarse hasta unos 10 metros, desplazando cantidades masivas del agua que se encuentra encima. Las perturbaciones del agua generadas por un terremoto comienzan a viajar en forma de ondas que pueden alcanzar los 800 km/h (la velocidad de un avión comercial), y que mar adentro pueden pasar desapercibidas. Al acercarse a las costas, se apilan formando paredes de agua (de hasta decenas de metros de altura) que entran en las costas, tierra adentro, arrasando todo a su paso y generando gran devastación. (Grotzinger et al., 2007). Dos ejemplos devastadores recientes de este fenómeno se presentaron, uno en Sumatra (Diciembre 26 de 2004), por un sismo de magnitud $M_w=9.2$ y el otro en Japón (11 de marzo de 2011), debido a un sismo de magnitud $M_w=9.0$.

El primero, arrasó las regiones costeras del océano Índico desde Indonesia y Tailandia hasta Sri Lanka, India y las costas orientales de África. Se calcula que al menos 230 000 personas perdieron la vida, que hubo 2 millones de desplazados y que un millón y medio más perdieron el modo de percibir su sustento. Los daños materiales ascendieron a 14 000 millones de dólares. A este desastre le siguió un problema de desabastecimiento de agua potable y una complicada situación de saneamiento e higiene que detonó enfermedades como el cólera, disentería y hepatitis (Olazábal, 2014). El segundo, en la costa pacífica de Tohoku, Japón, causó más de 15 000 muertes y más de 4 500 desaparecidos. (Fujii et al., 2011). Las enormes olas viajaron cruzando el pacífico hasta Alaska, Hawái y Chile. Las pérdidas materiales se estimaron entre 171 000 y 183 000 millones de dólares (Pagano, 2011). Un impacto inesperado y muy peligroso de este tsunami fue un fallo en la Planta Nuclear Fukushima Daiichi, que sufrió un derretimiento de alto nivel debido a fuga de material radiactivo. A pesar de que Japón es un país que

depende (o dependía) en gran proporción de su energía nuclear, varios reactores tuvieron que ser clausurados (Oskin, 2015). Las consecuencias a corto y largo plazo de la fuga radiactiva todavía siguen siendo estudiadas.

4.6.2. Licuefacción de arenas

Es un proceso en el que un suelo compuesto por arenas saturadas de agua, comienza a comportarse como un líquido en presencia de movimientos bruscos del terreno. Bajo condiciones normales, los granos de arena están en contacto unos con otros (bajo esfuerzos de fricción) y el agua llena los poros entre ellos. Cuando llegan movimientos o sacudidas fuertes del suelo, los granos se separan y la arena se comienza a comportar como un medio fluido tipo fangoso. Los suelos compuestos por sedimentos sueltos y propensos a saturarse son los más propensos a presentar este fenómeno. Las estructuras civiles pueden sufrir hundimientos permanentes o volcamiento. Este fenómeno puede causar efectos devastadores, ya que puede presentarse a lo largo de grandes extensiones de territorio y generar un proceso conocido como “extensión lateral” (ver Peña-Alonso y Villalobos-Escobar, en este libro), lo que puede causar inestabilidad de laderas o desplazamientos del terreno de hasta kilómetros de distancia (Stein y Wyssession, 2003). Ver figura 4.11



Figura 4.11. Daños a un complejo departamental debidos a licuefacción de arenas durante el sismo de junio 16 de 1964, en Niigata, Japón.

Lista de referencias

- CARDONA, O. D. (1993). *Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo*. En: A. Maskrey (ed.) Los desastres no son naturales, 51-74.
- COHEN, B. (2004). Urban growth in developing countries: a review of current trends and a caution regarding existing forecasts. *World development*, 32(1), 23-51.
- CHÁVEZ-GARCÍA, F. J., Y BARD, P. Y. (1994). Site effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13(4), 229-247.
- ELNASHAI, A. S., GENCTURK, B., KWON, O. S., AL-QADI, I. L., HASHASH, Y., ROESLER, J. R., ... & VALDIVIA, A. (2010). The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010: Consequence assessment and case studies.
- FREY, W. H., Y ZIMMER, Z. (2001). Defining the city. *Handbook of urban studies*, 1, 14-35.
- FUJII, Y., SATAKE, K., SAKAI, S. I., SHINOHARA, M., & KANAZAWA, T. (2011). Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, planets and space*, 63(7), 55.
- GROTZINGER, J., PRESS, F., Y SIEVER, R. J. TH (2006). *Understanding Earth*, 5th edition. Freeman & Co; Edición: Psc
- LEIVA, M. C., Y QUINTANA, G. R. (2010). Factores ambientales y psicosociales vinculados a síntomas de ataque de pánico después del terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010 en la zona central de Chile. *Terapia psicológica*, 28(2), 161-167.
- LAY, T., Y WALLACE, T. C. (1995). *Modern global seismology* (Vol. 58). Academic Press. EE.UU.
- LEYTON, F., RUIZ, S., Y SEPÚLVEDA, S. A. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean geology*, 37(2), 455-472.
- MIRANDA, E., MOSQUEDA, G., RETAMALES, R., Y PEKCAN, G. (2012). Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(S1), S453-S471.
- NAVA, A. (2011). *Terremotos*. Fondo de cultura económica. México.
- OLAZÁBAL, V. (2014, 12, 26). El Mundo, recuperado de: <http://www.elmundo.es/internacional/2014/12/26/549bf12e268e3e2a668b456d.html>
- OSKIN, B. (2015). Japan earthquake & tsunami of 2011: Facts and information. *Live Science, New York*, 7.
- PAGANO, M. (2011, 03, 13). Japan Looks for Market Stability after Quake. The Independent, recuperado de: <http://www.independent.co.uk/news/business/news/Japan-looks-for-market-stability-after-quake-2240323.html>.

- RESTREPO, L. F., VILLARAGA, M. R., JARAMILLO, J. D., FARBIARZ, Y., VÉLEZ, A. F., RENDÓN, D. A., Y BETANCUR, G. (2007). *Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburrá*. Publicación Institucional, Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- SSN, SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL (2017). Preguntas Frecuentes. (s.f), de: <http://www.ssn.unam.mx/divulgacion/preguntas/>.
- STEIN, S., & WYSESSION, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. Consultado en línea: <http://levee.wustl.edu/seismology/book/>
- TARBUCK, E. J., LUTGENS, F. K., & TASA, D. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física.
- USGS1. (2017). Earthquake Glossary (earthquake). (s.f), de: <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=earthquake>
- USGS2, (2017). Earthquake Glossary (seismograph). (s.f), de: <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?termid=167>

SOBRE LOS AUTORES

Elda M. Hernández Rejón
Coordinadora

Dora Manzur Verástegui
Raúl Treviño Hernández
Tomás Peña Alonso
Gina Villalobos Escobar
Autores

Elda Margarita Hernández Rejón

Doctora en Planificación Territorial y Desarrollo Regional por la Universitat de Barcelona, España. Maestría en Ingeniería Portuaria. e Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Profesora-Investigadora de la Facultad de Ingeniería, UAT. Perfil PRODEP. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Líder del CA Planificación Territorial y Sustentabilidad en áreas metropolitanas. UAT-CA-89

Raúl Treviño Hernández

Doctor en Geografía, Planificación Territorial y Gestión Ambiental por la Universitat de Barcelona, España. Maestría en Ingeniería Portuaria. e Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería, UAT. Perfil PRODEP. Integrante del CA Planificación Territorial y Sustentabilidad en áreas metropolitanas. UAT-CA-89

Dora Manzur Verástegui

Doctora en Medio Ambiente por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Maestría en Ingeniería Ambiental por la Universidad del Noreste. Profesora-Investigadora de la Facultad de Ingeniería, UAT. Perfil PRODEP. Integrante del UAT-CA-89

Tomás Peña Alonso

Doctor en ciencias de la Tierra con énfasis en Geología, por el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, Baja California, México. Ingeniero en Geociencias por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería, UAT. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Colaborador del UAT-CA-89

Gina Villalobos Escobar

Doctora en Ciencia de la Tierra con énfasis en Sismología por el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, Baja California, México. Maestría en Ciencias de la Tierra con énfasis en Sismología por la misma institución. Ingeniero Civil por la Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Profesora-Investigadora de la Facultad de Ingeniería, UAT. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Colaborador del UAT-CA-89

Planeación y sustentabilidad: realidades y desafíos en áreas urbanas del noreste de México coordinadora Elda Margarita Hernández Rejón, publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y Colofón, se terminó de imprimir en marzo de 2019 en los talleres de Ingramex S.A. de C.V. El tiraje consta de 300 ejemplares impresos de forma digital en papel Cultural de 75 gramos. El cuidado editorial estuvo a cargo del Consejo de Publicaciones UAT.

